

KLIWAS Kompakt
KLIWAS-22/2013

Auswirkungen des Klimawandels
auf Wasserstraßen und Schifffahrt –
Entwicklung von Anpassungsoptionen

Ausgewählte, vorläufige Ergebnisse
zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11. 2013

Forschungsstand: Sommer 2013

Koblenz, im November 2013

KLIWAS Kompakt

KLIWAS-22/2013

Auswirkungen des Klimawandels
auf Wasserstraßen und Schifffahrt
– Entwicklung von Anpassungsoptionen

Ausgewählte, vorläufige Ergebnisse
zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11. 2013

Forschungsstand: Sommer 2013

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|--------------|
| 1. WARUM KLIWAS? | S. 9 |
| 2. KLIMAWANDEL UND WASSERSTRASSEN IN DEN MEDIEN | S. 13 |
| 3. DER INTEGRALE FORSCHUNGSANSATZ | S. 15 |
| 3.1 Merkmale des KLIWAS-Forschungsansatzes | S. 15 |
| 3.2 Daten für Binnengewässer | S. 18 |
| 4. DEUTSCHE BUCHT, NORDSEE UND NORDOSTATLANTIK | S. 21 |
| 4.1 Klima, Klimaauswirkungen und Meeresspiegel: Nordsee und Nordostatlantik | S. 21 |
| 4.2 Tidekennwerte und Seegangsstatistik (Küste) | S. 28 |
| 4.3 Geodätische Beiträge zu KLIWAS | S. 30 |
| 4.4 Auswirkungen auf Hydrodynamik in Nordseeästuaren und Ostsee und Untersuchungen zu Anpassungsoptionen | S. 32 |
| 4.5 Nordseeästuare: Sedimenthaushalt und Schadstoffe | S. 35 |
| 4.6 Wasserbaumaterialien | S. 39 |
| 4.7 Klimarelevante Schadstoffe: Biozide, Insektizide, UV-Filter | S. 40 |
| 4.8 Argentoxine | S. 41 |
| 4.9 Sauerstoffgehalte und Algen in Nordseeästuaren | S. 41 |
| 4.10 Mikrobiologisch-hygienische Betrachtung der Küstengewässer | S. 43 |
| 4.11 Vorlandvegetation in Nordseeästuaren | S. 44 |
| 5. DIE ELBE | S. 49 |
| 5.1 Klima im Elbe-Einzugsgebiet | S. 50 |
| 5.2 Hydrologie im Elbe-Einzugsgebiet | S. 52 |
| 5.3 Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung | S. 53 |
| 6. DIE DONAU | S. 57 |
| 6.1 Klima im Donau-Einzugsgebiet | S. 57 |
| 6.2 Hydrologie im Donau-Einzugsgebiet | S. 58 |
| 7. DER RHEIN | S. 61 |
| 7.1 Klima im Rhein-Einzugsgebiet | S. 61 |
| 7.2 Hydrologie im Rhein-Einzugsgebiet | S. 63 |
| 7.3 Bewertungen für die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft am Rhein | S. 64 |
| 7.4 Sedimente, Flussbettentwicklung und Schadstoffe im Rhein | S. 66 |
| 7.5 Wasserbeschaffenheit im Rhein | S. 70 |
| 7.6 Wasserbauliche Anpassungsoptionen für den Ober-/Mittelrhein | S. 71 |

| | |
|---|--------|
| 8. ÜBERREGIONALE THEMEN | S. 75 |
| 8.1 KLIWAS-Klimatologie | S. 75 |
| 8.2 Wetterlagenbezogene Aussagen für die ferne Zukunft | S. 76 |
| 8.3 Eisbildung | S. 76 |
| 8.4 Tierökologie | S. 79 |
| 8.5 Wasserbaumaterialien | S. 81 |
| 8.6 Klimarelevante Schadstoffe: Biozide, Insektizide, UV-Filter | S. 83 |
| 8.7 Algentoxine | S. 84 |
| 8.8 Mikrobiologisch-hygienische Aspekte in Binnengewässern | S. 84 |
| 8.9 Auenvegetation | S. 85 |
| 8.10 Indikatoren-Konzept | S. 86 |
| 9. GLOSSAR | S. 91 |
| 10. ABKÜRZUNGEN | S. 97 |
| 11. LITERATUR | S. 101 |
| 12. DAS KLIWAS-TEAM | S. 107 |
| 13. DIE KLIWAS-KOOPERATIONSPARTNER UND AUFTRAGNEHMER | S. 111 |
| 14. DIE KLIWAS-PROJEKTE | S. 115 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|----------------------|---|-------------------|
| Abbildung 1: | Die KLIWAS-Modellkette für Binnenwasserstraßen | Kap. 3.1 S. 16 |
| Abbildung 2: | Prinzip der Altimetrie | Kap. 4.3 S. 31 |
| Abbildung 3: | Einzugsgebiet der Elbe mit Pegeln | Kap. 4.5 S. 36 |
| Abbildung 4: | Sauerstoffgehalte am Elbe-Kilometer 629 | Kap. 4.9 S. 42 |
| Abbildung 5: | Habitatänderung an der Elbe, basierend auf zwei Szenarien. | Kap. 4.11 S. 45 |
| Abbildung 6: | Typische klimaabhängige Störungs- und Sukzessions-Pfade im Röhricht. | Kap. 4.11 S. 45 |
| Abbildung 7: | Sohlentwicklung am Oberrhein | Kap. 7.4 S. 67 |
| Abbildung 8: | Sohlentwicklung am Niederrhein | Kap. 7.4 S. 67 |
| Abbildung 9: | Relative Sohlentwicklung am Oberrhein | Kap. 7.4 S. 68 |
| Abbildung 10: | Relative Sohlentwicklung am Niederrhein | Kap. 7.4 S. 68 |
| Abbildung 11: | Änderungen der Wassertemperatur auf der Rheinstrecke zwischen Karlsruhe und Bimmen | Kap. 7.5 S. 70 |
| Abbildung 12: | Veränderung der Kältesummen in Deutschland. Ausgewählte Rasterzellen vor dem Hintergrund des Gewässernetzes der Bundeswasserstraßen | Kap. 8.3 S. 77 |
| Abbildung 13: | Vergleich der Winter ohne Eissperrung an DEK (Dortmund-Ems-Kanal), MLK (Mittellandkanal), OSK (Oder-Spree-Kanal) und MDK (Main-Donau-Kanal) | Kap. 8.3 S. 78 |
| Abbildung 14: | Pfannkucheneis auf der Elbe, Januar 2006 | Kap. 8.3 S. 78 |
| Abbildung 15: | Dikerogammarus villosus (großer Höckerflohkrebs) und Gammarus fossarum (Bachflohkrebs) | Kap. 8.4 S. 80 |
| Abbildung 16: | Gegenüberstellung der Temperaturpräferenzen ausgewählter Gammariden-Arten und der Tagesmitteltemperaturen | Kap. 8.4 S. 80 |
| Abbildung 17: | Schematische Darstellung des Indikatorenkonzepts | Kap. 8.10 S. 87 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|--------------------|---|------------------|
| Tabelle 1: | Postprozessierte Rasterdaten für Lufttemperatur (Ta2m), Niederschlag (P), Globalstrahlung (G) und relative Feuchte (RF) fertiggestellt (blau), in Bearbeitung (orange) | Kap. 3.2 S. 19 |
| Tabelle 2: | Bandbreiten der Abweichungen atmosphärischer Klimaparameter über der Nordsee vom Zeitraum 1961 bis 1990 für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2070 bis 2099). | Kap. 4.1 S. 24 |
| Tabelle 3: | Bandbreiten der Abweichungen ozeanischer Parameter über der Nordsee vom Zeitraum 1961 – 1990 für die nahe Zukunft (2021 – 2050) und die ferne Zukunft (2070 – 2099). | Kap. 4.1 S. 26 |
| Tabelle 4: | Höhen und Höhenänderungen an ausgewählten GNSS-Pegelstationen | Kap. 4.3 S. 31 |
| Tabelle 5: | Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Elbe-Einzugsgebiet. Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990 | Kap. 5.1 S. 51 |
| Tabelle 6: | Mittel- und Niedrigwasserkennwerte (MQ und NM7Q) im Elbe-Einzugsgebiet | Kap. 5.2 S. 53 |
| Tabelle 7: | Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Donau-Einzugsgebiet. Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990 | Kap. 6.1 S. 57 |
| Tabelle 8: | Mittel- und Niedrigwasserkennwerte (MQ und FDC-Q90) für die Donau | Kap. 6.2 S. 58 |
| Tabelle 9: | Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Rhein-Einzugsgebiet. Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990 | Kap. 7.1 S. 62 |
| Tabelle 10: | Mittel- und Niedrigwasserkennwerte (MQ und NMQ) für den Rhein | Kap. 7.2 S. 64 |



1. WARUM KLIWAS?

Der Klimawandel ist seit einigen Jahren in unterschiedlichsten Projekten Gegenstand der Forschung. Im Laufe dieser Forschungsarbeiten wurde festgestellt, dass je nach verwendetem (Klima-)Modell voneinander abweichende Ergebnisse erzielt werden. Daher erschien es sinnvoll, Ergebnisse möglichst vieler Klimamodelle zusammenzuführen und zu vergleichen. Diese Vorgehensweise wurde beispielsweise in unterschiedlichen Berichten des Weltklimarates (2001 und 2007) dokumentiert. Jeder dieser Berichte stieß auf große Resonanz und Akzeptanz.

Diese Berichte sowie die Auswirkungen des lang anhaltenden Niedrigwassers im Sommer 2003 im Rhein veranlassten Schifffahrtsverbände und Industriebetriebe, die künftige Nutzbarkeit des Rheins als Wasserstraße abschätzen zu lassen. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) beauftragte daraufhin im Jahr 2007 die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) mit einer Studie, die hydrologischen Verhältnisse des Rheins, der als Wasserstraße von hoher wirtschaftlicher Bedeutung für Europa ist, für die kommenden Jahrzehnte zu bewerten und abzuschätzen. Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Welche Ergebnisse der internationalen und regionalen Klimaforschung liegen bereits vor?
- In welchem Ausmaß kann der Klimawandel die hydrologischen Verhältnisse des Rheins verändern?
- In welcher Art wird die Schifffahrt und die verladende Wirtschaft durch veränderte hydrologische Verhältnisse betroffen sein?
- Mit welchen Anpassungsmaßnahmen lassen sich diese wirtschaftlichen Betroffenheiten mindern?
- Lassen sich die Ergebnisse auf andere Wasserstraßen übertragen?

Die Ergebnisse der beauftragten Studie veröffentlichte das BMVBS 2007 unter dem Titel „Bestandsaufnahme. Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels“. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen beauftragte das BMVBS die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), den Deutschen Wetterdienst (DWD), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) mit dem von 2009 bis 2013 laufenden Forschungsprogramm „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Entwicklung von Anpassungsoptionen“. Neben dem Rhein wurden nun auch die Elbe, die Donau und Küstengewässer untersucht.

Die oben genannten Fragen wurden ergänzt durch:

- Wie wird der Klimawandel die Küsten und die Meeresnutzung (vor allem die Seeschifffahrt) verändern?
- Werden die Zufahrten zu den deutschen Seehäfen durch häufigeres Eintreten von Stürmen und Sturmfluten beeinträchtigt?
- Werden sich Schadstoffe in Gewässern und Sedimenten anders verteilen?
- Welche Änderungen ergeben sich für Baggerstrategien und Unterhaltungskonzepte?
- Müssen Strombaukonzepte in den Ästuaren angepasst werden?
- In welchem Maß sind ökologische Schutzgüter sowie Vegetation und Fauna in und an Wasserstraßen betroffen? Wie kann dem begegnet werden?
- Wird sich die Erosion an den Ufern, Deckwerken, Unterwasserböschungen und in den Vorländern ändern?
- Sind erhöhte Belastungen von Kajen, Schleusen oder auch Sperrwerken zu erwarten?
- Werden Veränderungen der seegangsinduzierten Belastungen in Bezug auf Seezeichen, Seeschiffe, Offshore-Konstruktionen, Küsten- und Küstenschutzbauwerke, Hafenanlagen sowie Bauwerke im Strom eintreten?
- Welche Anpassungsmaßnahmen können in Erwägung gezogen werden?

Mit der Beantwortung aller Fragen sollten Unsicherheiten in der Forschung aufgezeigt und Wege dargelegt werden, diese Unwägbarkeiten so weit als möglich zu mindern, um politische Entscheidungen über künftige Anpassungsmaßnahmen durch fundierte wissenschaftliche Ergebnisse zu begründen.

Die Forschungsarbeiten werden noch bis zum Jahresende 2013 laufen. Für die 3. KLIWAS-Statuskonferenz geben wir Ihnen mit KLIWAS kompakt einen Einblick in die Bandbreite unserer Ergebnisse. Dargestellt ist der Arbeitsstand Sommer 2013. Die Erstellung aller Schlussberichte wird im ersten Halbjahr 2014 abgeschlossen sein.







2. KLIMAWANDEL UND WASSERSTRASSEN IN DEN MEDIEN

Wissenschaft ist kein Selbstzweck, vielmehr dient sie dazu, Wissen zu schaffen, zu nutzen und zu vermitteln. Einen Weg der breit gestreuten Wissensvermittlung bieten Medien. Wissenschaft und Medien verfolgen unterschiedliche Ziele, bedienen sich folglich unterschiedlicher Sprachen. Klimawissenschaftler verständigen sich durch standardisierte Begriffe wie Klimaprojektion, Szenario, Modellkette oder Modellergebnis. Medien stehen im Wettbewerb um kurzfristige Aufmerksamkeit. Dies mag der Beweggrund für eine Berichterstattung sein, die sich der Worte Klimakatastrophe, Klimakollaps oder Klimälüge bedient. Information wird zu Emotion. Ein vermutetes Sensationsbedürfnis der Menschen soll bedient werden.

Erkenntnisse der Wissenschaft können – fast – niemals als endgültige Ergebnisse betrachtet werden. Vielmehr ist die beständige Überprüfung bestehender Erkenntnisse ein Teil, eine Triebfeder der Wissenschaft. Begriffe wie „Klimakatastrophe“ oder „Klimälüge“ beanspruchen jedoch etwas Absolutes, etwas Endgültiges für sich. Dies kann und muss die Glaubwürdigkeit von Wissenschaftlern in der Öffentlichkeit reduzieren.

Ein Beispiel der 80er Jahre bildet der Begriff „Waldsterben“. Deutsche Wälder sind nicht gesund, auch heute nicht. Wenn es heute noch Wälder gibt, die zumindest gesund erscheinen, so liegt dies auch an der wissenschaftlichen Abarbeitung eines komplexen Themas: (a) Zustandsbeschreibung, (b) Ursachenforschung, (c) Entwicklung von Maßnahmen zur Vermeidung weiterer Schäden und zur Erholung der Bestände. Der letzte Schritt, (d) die Umsetzung von Vermeidungsstrategien, ist ein politischer, also ein außerhalb der Wissenschaft liegender Schritt. Im Bewusstsein der Bevölkerung ist der Begriff „Waldsterben“ verankert. Das Waldsterben ist nicht eingetroffen. Dafür mag es eine Vielzahl von Gründen geben. Im Bewusstsein der Allgemeinheit hat jedoch die Glaubwürdigkeit der Wissenschaft gelitten.

Hieraus leitet sich der hohe Anspruch des Forschungsprogramms KLIWAS ab. KLIWAS vereinigt 100 hochqualifizierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, deren Ziel die ruhige und sachliche Abarbeitung der Klimawirkung auf Wasserstraßen ist, die daraus Anpassungsmaßnahmen ableiten, und diese politischen Gremien zur Entscheidung vorlegen. In dieses Ziel haben diese „Wissen Schaffenden“ viel Energie und analytisches Vermögen investiert. Alle existierenden Forschungsergebnisse sind in die KLIWAS-Analysen eingeflossen. KLIWAS kann dennoch *keinen* Anspruch darauf erheben, Recht zu haben oder Recht zu behalten. KLIWAS erhebt den Anspruch darauf, umfassend, in einer Breite (unterschiedliche wissenschaftliche Gebiete) und Tiefe (unterschiedliche Methoden) nach heutigem Stand des Wissens und nach heutigem Stand der methodischen Möglichkeiten beste Ergebnisse zu erzielen. Diesen Anspruch auch in der öffentlichen Wahrnehmung zu halten, schließt emotionale Berichterstattung aus.





3. DER INTEGRALE FORSCHUNGSANSATZ

3.1 MERKMALE DES KLIWAS-FORSCHUNGSANSATZES

Im Forschungsprogramm KLIWAS kooperieren Wissenschaftler aus ca. 20 Disziplinen in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) mit ca. 100 europäischen Wissenschaftsinstitutionen. Ziel ist, klimabedingte Einflüsse auf Wasserstraßen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) abzuschätzen sowie Anpassungsoptionen zu entwickeln und zu bewerten.

KLIWAS zeichnet sich insbesondere durch seinen integralen Ansatz, der das Verständnis zu den deutschen Gewässersystemen erhöhen wird, aus.

Die Herausforderung ist groß. Es geht um nichts weniger, als das komplexe Zusammenspiel einer Vielzahl von Vorgängen im Erdsystem genügend genau zu beschreiben, so dass anschließend die Wirkung von Änderungen einzelner Einflussgrößen quantifiziert werden kann. Jedoch ist das Erdsystem bestimmt durch ein subtiles, vielfältig komplex gekoppeltes Zusammenspiel von positiv und negativ rückkoppelnden, nichtlinearen Prozessen auf den unterschiedlichsten Zeit- und Raumskalen. Es ist nicht offensichtlich, welche Prozesse wann und unter welchen Umständen beherrschend und damit relevant sind.

MODELLKETTE: BANDBREITE DER FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Grundlage aller Untersuchungen sind Modelle der Dynamiken der unterschiedlichen Teilsysteme und der ihren Zustand beschreibenden Variablen (z. B. Niederschlag, Abfluss, Sedimenttransport, Gewässergüte, Artenzusammensetzung). Dabei muss die globale Ursache (Emissionsszenario) hinsichtlich der Wirkungen auf die regionale Skala heruntergebrochen werden; dort wo Menschen leben und potenziell betroffen sind. Die Herausforderung der Modellbildung besteht darin, bei bestehender Datenlage und für eine gegebene Fragestellung Prozessbeschreibungen so miteinander zu kombinieren, dass die Prozesse einerseits auch lokal möglichst realistisch abgebildet werden, andererseits aber Fehler aufgrund mangelnder Prozesskenntnis und deren Fortpflanzung in Prozessketten gering bleiben.

In KLIWAS wurde mit Hilfe der sogenannten *Modellkette* (siehe Abbildung 1) gearbeitet. Dennoch existiert nicht das allumfassende Erdsystemmodell, sondern die verschiedenen Disziplinen haben Modelle für ihre jeweiligen Teilsysteme entwickelt. In einer Kette dieser Modelle wird das Ergebnis der jeweils vorgelagerten, häufig großskaligeren Modelle zur Eingabegröße für nachgelagerte detailliertere Modelle.

Die wissenschaftlichen Arbeiten in KLIWAS starten mit der für das Forschungsprogramm geeigneten Aufbereitung von Ergebnissen globaler Klimamodellläufe. KLIWAS konnte hierbei auf Ergebnisse des EU-Projektes ENSEMBLES zurückgreifen. Diese globalen Klimaprojektionen lassen (noch) keine Schlüsse auf regionale Änderungen zu. Sie werden deshalb regionalisiert, das heißt, in einem weiteren Modellierungsschritt auf einen geeigneten Maßstab heruntergerechnet. Dabei werden regionale Besonderheiten berücksichtigt (z. B. die Geländeform bzw. Luv und Lee). Diese Ergebnisse wiederum fließen in hydrologische Modellierungen ein, die Ergebnisse zu veränderten Abflüssen bzw. zu veränderten Tiden liefern. Auf diese Ergebnisse greifen weitere Wissenschaftler zurück,

um beispielsweise morphologische, chemische und ökologische Änderungen im und am Gewässer zu modellieren.

Die Modellierung der Küstengewässer und der Nordsee unterscheidet sich in einigen Merkmalen von der Modellierung der Binnengewässer. So wird dort beispielsweise auf statistische Regionalisierungsverfahren und auf Bias-Korrekturen¹ verzichtet. Stattdessen werden neben rein atmosphärischen Szenarien (ungekoppelte Szenarien) zusätzlich die in KLIWAS entwickelten „gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Szenarien“ bearbeitet. Diese benötigen keine Bias-Korrektur.

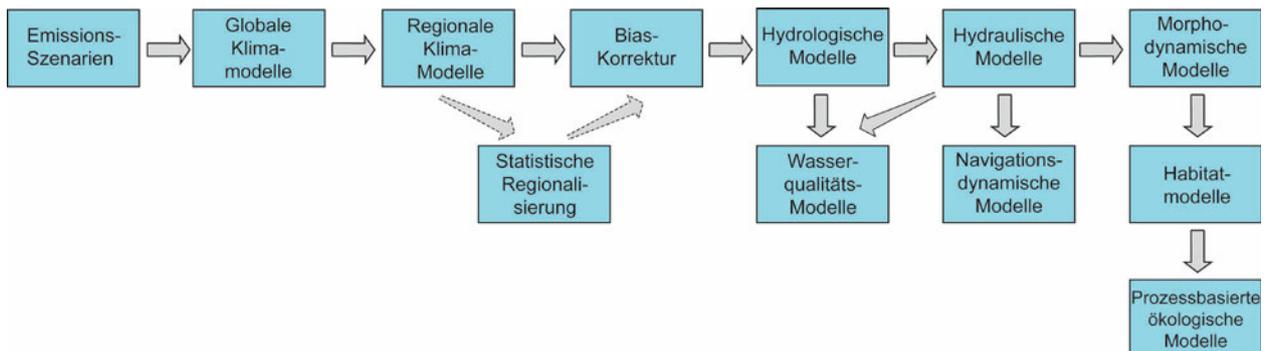


Abbildung 1: Die KLIWAS-Modellkette für Binnenwasserstraßen

MULTIMODELLANSATZ: BANDBREITE DER MODELLE

Die Vielfalt der bearbeiteten Fragen entlang dieser Modellkette ist der erste Baustein des integralen Ansatzes. Der zweite Baustein ist der sogenannte *Multimodellansatz*. Das bedeutet, dass die Forschungen von KLIWAS soweit wie möglich nicht auf einem Modell pro Modellerschritt beruhen, sondern auf jeweils mehreren verfügbaren Modellen. Dieses Vorgehen mag zunächst überraschen, führt es doch zu einer größeren Bandbreite an Ergebnissen, als die Nutzung eines einzelnen Modells. Jedoch kann vielfach keinem einzelnen Modell gegenüber einem anderen der Vorzug gegeben werden. Grundsätzlich ist es zwar erstrebenswert, das beste Modell bzw. die beste Kette von Modellen zu identifizieren. Tatsächlich ist dies aber bei heutiger Datenlage und gegenwärtigem Prozessverständnis der komplexen Zusammenhänge im Erdsystem noch nicht möglich. In der Praxis werden die Modelle aussortiert, die besonders große Abweichungen gegenüber Beobachtungen zeigen; die Übrigen bilden ein sogenanntes Ensemble von als gleichwertig zu betrachtenden Simulatoren möglicher Zukünfte.

Die Ergebnisbandbreite spiegelt somit die Unsicherheiten der Klimamodelle wider. Dies bedeutet insbesondere, dass nicht empfohlen werden kann, weitreichende Entscheidungen auf Basis des Ergebnisses einer einzelnen Modellkette zu treffen; denn deren Untersuchung liefert lediglich Aussagen über *eine* mögliche Zukunft, jedoch keinesfalls über *die* Zukunft. Auch dürfen die ermittelten Bandbreiten nicht überbewertet werden, denn auch sie können nicht alle Einflüsse und denkbaren Szenarien repräsentieren. Eindeutige Zukunftsaussagen sind somit nicht möglich. Jedoch bietet das Bündel möglicher Zukünfte Anhaltspunkte für beste und ungünstigste Entwicklungen und damit Entscheidungsträgern eine Basis, in Abwägung von Aufwand und Schadenspotenzialen, aber auch gesellschaftlichem Willen und Vermögen, angemessene Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen zu treffen.

Deshalb werden im Forschungsprogramm KLIWAS auch technische Anpassungsoptionen an potenziell veränderte Gewässerzustände erarbeitet und bewertet. Diese ba-

¹ Siehe Glossar.

sieren auf Szenarien, z. B. auf möglichen veränderten Abflüssen innerhalb einer Binnenwasserstraße. Diese Optionen werden teilweise mit betriebswirtschaftlichen Kosten verknüpft. Entscheider aus Ministerien und/oder Parlamenten können nun anhand der Bandbreite möglicher veränderter Abflüsse und den dafür geeigneten Anpassungsmaßnahmen darüber befinden, welche Maßnahmen zu welchem Zeitpunkt umgesetzt werden, bzw. welche Risiken politisch und gesellschaftlich akzeptiert werden können oder müssen. Dabei wird es auch möglich sein, dass selbst unter Ausnutzung der sogenannten „Anpassungskapazität“ Risiken für die Gesellschaft verbleiben. Anpassung an veränderte Lebensbedingungen indes ist kein neuer Prozess. Vielmehr wird seit Jahrzehnten und Jahrhunderten immer wieder neu entschieden, wie beispielsweise Hochwasserschutz entlang von Gewässern dimensioniert wird oder, anders ausgedrückt: welche Risiken für die Betroffenen bzw. für die Gesellschaft verbleiben.

UNSIHERHEITEN: UMGANG MIT KLIMAPROJEKTIONEN

Für Aussagen über die mögliche Entwicklung unseres Klimas werden u. a. globale Klimamodelle (Global Climate Models, GCM) benötigt, die möglichst alle relevanten Prozesse des Klimasystems berücksichtigen. Diese Klimamodelle beschreiben die Reaktion des Klimasystems auf eine externe Änderung und produzieren somit keine Vorhersage, sondern projizieren jeweils ein mögliches Bild der zukünftigen Klimaentwicklung. Als energetischer Antrieb für diese Modellläufe werden Emissionsszenarien verwendet. Sie enthalten mögliche Entwicklungen anthropogener Emissionen von Treibhausgasen, die ihrerseits auf möglichen globalen sozioökonomischen Entwicklungen basieren.

Die Ergebnisse aus den einzelnen Klimamodellrechnungen enthalten Unsicherheiten hinsichtlich

- der zugrunde liegenden Emissionsszenarien,
- der Start- und Randbedingungen der Modellläufe,
- der Modellparametrisierung,
- der zugrunde liegenden Beobachtungswerte,
- technischer Grenzen der Rechnerleistung und Speicherkapazität,
- der Kopplung verschiedener Modelle,
- bestehender Wissenslücken von Prozessen und Kopplungen im Klimasystem.

Es liegt auf der Hand, dass mit jedem Schritt entlang der KLIWAS-Modellkette die Unsicherheiten wachsen. Jedes einzelne Modell produziert ein „vereinfachtes Bild der Wirklichkeit“, berücksichtigt also nicht alle in der Natur vorkommenden Einflussfaktoren.

KLIMAPROJEKTIONEN UND REFERENZDATEN FÜR BINNENWASSERSTRASSEN

Für die Regionalisierung von meteorologischen Beobachtungsdaten wurde das im DWD etablierte REGNIE-Verfahren² für den Niederschlag angewandt und weiterentwickelt, und ein Interpolationsverfahren (*Kriging*) für Lufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung verwendet. Für das statistische *Downscaling* (Binnengewässer) von Klimaprojektionen der Größen Niederschlag, Temperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung auf 5 x 5 km² wurden Regionalisierungsverfahren entwickelt (z. B. lineare multiple Regression und semiphysikalische Verfahren) und Biaskorrekturverfahren (monatsbasiertes linearscaling, linearscaling unter Berücksichtigung von Wetterlagen, „Quantile-Mapping“³) erstellt. Darüber hinaus wurde eine Software für die klimatologisch-statistische Auswertung der HYRAS-Referenzdaten und Klimaprojektionen aufgebaut.

² Für Details siehe Rauthe et al., 2013.

³ Für Details siehe Imbery et al., 2013.

3.2 DATEN FÜR BINNENGEWÄSSER

KLIMAPROJEKTIONEN

Für die Auswertung der beobachteten Klimazeitreihen im Beobachtungszeitraum 1951 bis 2006 stehen tägliche Rasterdaten in der räumlichen Auflösung von $5 \times 5 \text{ km}^2$ (und $1 \times 1 \text{ km}^2$) für die KLIWAS-Domain bereit (HYRAS-Datensatz). Die HYRAS-Datensätze stehen in folgenden Versionen zur Verfügung:

- HYRAS Niederschlag Version 2.0
- HYRAS Lufttemperatur Version 1.01
- HYRAS relative Feuchte Version 1.01
- HYRAS Globalstrahlung Version 0.21

Derzeit existieren für das SRES-Szenario A1B 15 postprozessierte Klimaprojektionen sowie drei mit Reanalysedaten (ERA-40) angetriebene Klimamodelle ($5 \times 5 \text{ km}^2$ und biaskorrigiert) für die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur und Globalstrahlung für den Zeitraum 1951 bis 2100. Sie sind in der Tabelle 1 blau gekennzeichnet. Demnächst werden auch die biaskorrigierten Datensätze der relativen Feuchte bereitstehen (auf $5 \times 5 \text{ km}^2$ bereits regionalisiert), siehe Tabelle 1.

Für die Auswertung des regionalisierten und korrigierten Klimaprojektions-Ensembles wurden unter anderem die 15. und 85. Perzentile gebildet. Die dazwischen liegenden 70 Prozent der Informationen können als wahrscheinliche Informationen aus dem Ensemble betrachtet werden. Aus diesen 70 Prozent leiten sich dann zum Beispiel die Bandbreiten der möglichen Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags in Tabelle 2 ab.

Zusätzlich haben wir eine Auswertung sowie die visuelle Aufbereitung der Originaldatensätze in einer räumlichen Auflösung von $25 \times 25 \text{ km}^2$ (Originalauflösung der Klimamodelle) für den Zeitraum 1961 bis 2100 für Deutschland erstellt. Insgesamt 19 Klimaprojektionen des Szenarios A1B für die meteorologischen Parameter und Klimaindizes Temperatur, Eistage, Sommertage, Frosttage, Heiße Tage, Tropennächte und Niederschlag sind im Klimaatlas des DWD unter www.dwd.de/klimaatlas zu finden.

Neben der Datenprozessierung wurde ein Konzept zur Archivierung und Datenbereitstellung entwickelt. Damit soll ein behördenübergreifendes Datenmanagement, die Vereinheitlichung von Datensätzen und die zukünftige Datenbereitstellung sichergestellt werden.



Tabelle 1: Postprozessierte Rasterdaten für Lufttemperatur (Ta2m), Niederschlag (P), Globalstrahlung (G) und relative Feuchte (RF) fertiggestellt (blau), in Bearbeitung (orange)⁴

| DATENPROZESSIERUNG KLIWAS 1.02 | INSTITUT | FÖRDERUNG DURCH | TA 2M | P | G | RF |
|-----------------------------------|----------|--------------------|----------|---|---|----|
| ERA40_CLM2.4.6 | ETHZ | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| ERA40_REMO5.7 | MPI-M | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| ERA40_RM4.5 | CNRM | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_BCM2_RCA3 | SMHI | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_ECHAM5r1_CLM2.4.11 | GKSS | BMBF | | | | |
| A1B_ECHAM5r3_RACMO2 | KNMI | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_ECHAM5r3_REMO5.7 | MPI-M | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_HadCM3Q0_CLM2.4.6 | ETHZ | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_HadCM3Q0_HadRM3Q0 | METO-HC | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_ECHAM5r3_HIRHAM5 | DMI | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_ECHAM5r3_RegCM3 | ICTP | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_HadCM3Q16_RCA3 | C4I | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_ECHAM5r3_RCA3 | SMHI | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_HadCM3Q3_RCA3 | SMHI | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_ECHAM5r2_CLM2.4.11 | GKSS | BMBF | | | | |
| A1B_ARPEGE_RM5.1 | CNRM | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_ARPEGE_HIRHAM5 | DMI | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_BCM2_HIRHAM5 | DMI | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_HadCM3Q3_HadRM3Q3 | METO-HC | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |
| A1B_HadCM3Q16_HadRM3Q16 | METO-HC | EU-FP6 ENSEMBLES | | | | |

Die Metadatensätze zu den ersten acht postprozessierten Klimaprojektionen und den Ergebnissen der objektiven Wetterlagenanalyse von Klimaprojektionen sind bereits in den Klimadatenkatalog CDC (Climate Data Center) des DWD eingegangen. Weiterhin konnte das Konzept der Bereitstellung der Klimaprojektionsdatensätze unter der Web-Oberfläche WebWerdis des DWD weitestgehend umgesetzt werden. Somit sind Datenabfragen über das Internet seit Frühjahr 2013 möglich.

Alle gewonnenen Daten sind oder werden in behördeneigenen Portalen veröffentlicht. Zur leichteren Recherche ist eine Suchfunktion für alle am Forschungsprogramm KLIWAS beteiligten Oberbehörden eingerichtet worden. Diese Funktion ist auf www.kliwas.de unter „Daten, Dienste, Modelle“ zu finden.

⁴ Quellen: Keuler et al., 2009a, b, c; Lautenschlager et al., 2009; Uppala et al., 2005; Van der Linden et al., 2009.



4. DEUTSCHE BUCHT, NORDSEE UND NORDOSTATLANTIK

Die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes Deutschland erfordert eine leistungsfähige und wirtschaftliche Infrastruktur. 95 Prozent des gesamten interkontinentalen Warenaustauschs werden über die Seeschifffahrt abgewickelt. Daher haben bedarfsgerechte Bundeswasserstraßen im Küstenbereich, die Seehafenzufahrten und der Nord-Ostsee-Kanal, eine erhebliche Bedeutung als Bestandteil der Logistikketten.

Die deutschen Seehäfen sind wichtige intermodale Drehkreuze, über die ein Großteil des weltweiten Im- und Exportes läuft. Daher ist eine entsprechende Hinterlandanbindung durch Binnenwasserstraßen, Straße sowie Schiene natürlich ebenso wichtig.

Bis zum Jahr 2015 soll ein neuer Bundesverkehrswegeplan (BVWP) aufgestellt werden. Grundlage hierfür ist eine aktualisierte Verkehrsverflechtungsprognose 2030 einschließlich der Umlegung der prognostizierten Verkehrsnachfrage auf die Verkehrsinfrastruktur. Die Ergebnisse der Verkehrsprognose 2030 werden für Ende 2013 erwartet. Ein wichtiger Bestandteil, die „Seeverkehrsprognose – Eckwerte der Hafenumschlagsprognose“ liegt bereits vor.

Demnach ergibt sich für die 19 betrachteten deutschen Seehäfen nach der Seeverkehrsprognose ein anhaltender Wachstumstrend. Die Gesamtumschlagsvolumen der deutschen Häfen werden insgesamt von 269 Mio. t in 2010 auf 468 Mio. t in 2030 zunehmen. Dies entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von +2,8 Prozent.

Für den Verkehrsträger „Wasserstraße“ wird die Realisierung aller Maßnahmen des Vordringlichen Bedarfs (VB) angenommen, soweit sich nicht aus der aktuellen Netzkategorisierung etwas anderes ergibt.

Quellen:
Jahresbericht 2012 der WSD Nord,
Pressemitteilung BMVBS 153/2013,
www.bmvbs.de

4.1 KLIMA, KLIMAAUSWIRKUNGEN UND MEERESSPIEGEL: NORDSEE UND NORDOSTATLANTIK

HINTERGRUND UND METHODE

Globale Klimamodelle sind die Grundlage jeder Abschätzung zukünftiger klimabedingter Änderungen in der Umwelt. Für regionale Anwendungen, wie z. B. zur Ermittlung von möglichen Veränderungen in der Nordsee, lösen diese jedoch räumlich zu wenig auf, sodass sie auf einen geeigneten räumlichen Maßstab herunterskaliert, d. h. regionalisiert werden müssen. Diese Ergebnisse werden auf verschiedene Parameter hin analysiert, u. a. auf Windrichtung und -geschwindigkeit, Wasserstände, Luft- und Wassertemperaturen oder Salzgehalte.

Numerische Simulationen der Naturverhältnisse sind nicht ohne vereinfachende Annahmen möglich. Regionalmodelle (RCM) erhalten als Antrieb Randwerte aus globalen Modellen (GCM). Damit enthalten die Ergebnisse der RCMs, zusätzlich zu den eigenen Unsicherheiten, die der antreibenden GCMs. Wird als Ausgangsmodell lediglich ein einziges globales Klimamodell oder werden einander sehr ähnliche Modelle verwendet, dann resultieren in den regionalisierten Modellierungen daraus zumeist ähnliche Ergebnisse. Aus diesem Grund wird in der Regel ein Ensemble unterschiedlicher Kombinationen von Global- und Regionalmodellen eingesetzt, um vorhandene Unzulänglichkeiten einzelner Kombinationen zu kompensieren. Die Spannbreite aller Ergebnisse für einen bestimmten Parameter wird dann als Bandbreite bezeichnet. Dies hat die Konsequenz, dass sich bei einer Regionalisierung Bandbreiten kaum verringern lassen.

AUSWERTUNG DER EU-ENSEMBLES-PROJEKTIONEN FÜR DEN NORDSEERAUM

In KLIWAS wurden die *ungekoppelten* regionalen Klimaprojektionen des EU-Projektes ENSEMBLES, soweit diese den Nordseeraum einschließen, auf ihre Aussagen hinsichtlich möglicher Klimaänderungen (Atmosphäre) und auf die Tauglichkeit für die Prognose von schifffahrtsrelevanten meteorologischen Parametern hin analysiert. *Ungekoppelt* bedeutet, dass in den Klimamodellen Rückwirkungen des Meeres auf die Atmosphäre unberücksichtigt sind.

Um Abweichungen der einzelnen ENSEMBLES-Modellergebnisse von den Naturverhältnissen zu quantifizieren, wurden in KLIWAS die Projektionen mit der Reanalyse ERA-40 verglichen. Reanalysen sind mithilfe von Wettermodellen extrapolierte Beobachtungsdaten und werden als gute Näherung an die Naturverhältnisse betrachtet.

Für die KLIWAS-Modellierungen haben wir uns im Wesentlichen zweier Methoden bedient:

- *ungekoppelte* atmosphärische Modellierungen
- durch uns entwickelte *gekoppelte* Modellierungen, die die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre berücksichtigen.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Der Einfluss des in ENSEMBLES jeweils verwendeten globalen Klimamodells paust sich stark auf die Regionalisierungen durch.*
- *Je nach verwendeter Modellkonfiguration weichen die Klimaparameter mehr oder weniger stark von einer Reanalyse ab.*
- *Globale atmosphärische Reanalysen sind für Validierungen im regionalen Maßstab begrenzt geeignet.*
- *Windrichtung und Windstärke unterliegen einer hohen Variabilität. Signifikant positive wie negative Trends für den Zeitraum 1960 bis 2100 sind so gering, dass man keine einheitlichen Aussagen treffen kann. Dies gilt im Wesentlichen auch für windabhängige Phänomene, wie z. B. Seegang.*
- *Sturmfluten bewegen sich in Häufigkeit und Stärke um das heutige Niveau.*
- *Für den aus ECHAM5 berechneten Seegang zeigt sich bei den verwendeten Modellkonfigurationen ein Anstieg in der östlichen Nordsee und eine Abnahme in der westlichen Nordsee. Da Zunahmen der Windstärke nicht festzustellen sind, resultiert dies möglicherweise aus Änderungen der Windrichtung bei Starkwinden (s. o.). Für die östliche Deutsche Bucht (speziell Schleswig-Holsteinische Küste) ist bis 2100 ein Anstieg der signifikanten Wellenhöhe um bis zu 10 Prozent möglich.*
- *Die Auswertung der Ensembles sowie einzelner Modellkombinationen des Szenarios A1B ergeben keine Einschränkung für die Schifffahrt.*

Analysen der *ungekoppelten* regionalen ENSEMBLES-Projektionen (IPCC AR 4, Szenario A1B) zeigen, je nach Modellkombination, mehr oder weniger starke, zum Teil sogar unrealistische Abweichungen von der Reanalyse ERA-40. Allerdings können Reanalysen auch Schwächen aufweisen: So ist zum einen deren räumliche Auflösung zu grob, sodass die Variabilität gedämpft ist. Zum anderen werden Festlandseinflüsse weit in die offene Nordsee hinein extrapoliert. In den Regionalisierungen ist ebenfalls deutlich der Einfluss des verwendeten GCM zu erkennen.

Die Auswertung der ENSEMBLES-Projektionen hinsichtlich schifffahrtsrelevanter atmosphärischer Parameter wie Windrichtung, Windstärke und daraus abgeleitete Größen (z. B. Seegang, Windstau) über einen Zeitraum von 140 Jahren (1960 bis 2100) ergeben signifikant positive und negative, sowie auch nicht signifikante Trends über der Nordsee. Signifikante Trends sind allerdings sehr niedrig; die Zeitreihen werden von der großen dekadischen Variabilität dominiert.

Infolge dessen zeigen die windabhängigen Parameter wie Seegang und Sturmfluten einander ähnliche Verhaltensmuster. Allem gemein ist auch hier wieder eine starke Abhängigkeit vom Verhalten des verwendeten Globalmodells festzustellen.

Bezüglich der möglichen zukünftigen Auswirkungen auf die Schifffahrt können wir zusammenfassend sagen, dass die Auswertungen von EU-ENSEMBLES und einzelner Modellkombinationen des Szenarios A1B keine wesentlichen Veränderungen in der Nordsee erwarten lassen (siehe Tabelle 2). Die Bandbreite der Ergebnishäufigkeiten begründet sich neben modellinternen und variabilitätsbedingten Effekten vor allem auf die nicht systematische Auswahl der durch das ENSEMBLES-Projekt verwendeten Modelle und Modellläufe.

Für die KLIWAS-Modellierungen haben wir die Ergebnisse von 13 verschiedenen Klimamodellierungen des EU-ENSEMBLES-Projektes verwendet (Szenario A1B; ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.org>)⁵. Diese *ungekoppelten* regionalen Atmosphäre-Ozean-Klimamodelle nutzten zum Teil unterschiedliche globale Klimamodelle als Antrieb. Erste Ergebnisse *gekoppelter* regionaler Klimamodellierungen aus KLIWAS liegen innerhalb der in der Tabelle angegebenen Bandbreiten.

5 Für Details siehe Hewitt & Griggs, 2004.



Table 2: Bandbreiten der Abweichungen atmosphärischer Klimaparameter über der Nordsee vom Zeitraum 1961 bis 1990 für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2070 bis 2099).

| PARAMETER | JAHRES- ZEITEN | BANDBREITE DER ÄNDERUNG | |
|-------------------------------|-------------------|---|---|
| | | NAHE ZUKUNFT 2021 – 2050 | FERNE ZUKUNFT 2070 – 2099 |
| Lufttemperatur | Jahresmittel | +0,8 °C bis +1,9 °C | +1,8 °C bis +3,7 °C |
| | DJF | +0,6 °C bis +2,0 °C | +1,9 °C bis +3,7 °C |
| | MAM | +0,8 °C bis +1,8 °C | +1,8 °C bis +3,3 °C |
| | JJA | +0,5 °C bis +1,9 °C | +1,6 °C bis +3,5 °C |
| | SON | +0,7 °C bis +1,9 °C | +1,7 °C bis +4,0 °C |
| Wind- geschwindigkeit | Jahresmittel | -0,06 m/s bis +0,15 m/s | -0,26 m/s bis +0,26 m/s |
| | DJF | -0,16 m/s bis +0,36 m/s | -0,52 m/s bis +0,55 m/s |
| | MAM | -0,15 m/s bis +0,21 m/s | -0,15 m/s bis +0,34 m/s |
| | JJA | -0,09 m/s bis +0,17 m/s | -0,23 m/s bis +0,25 m/s |
| | SON | -0,18 m/s bis +0,32 m/s | -0,24 m/s bis +0,27 m/s |
| Wolken- bedeckungsgrad | Jahresmittel | -2,60 % bis +0,32 % | -3,84 % bis +1,92 % |
| | DJF | -2,41 % bis +0,21 % | -2,63 % bis +2,09 % |
| | MAM | -4,69 % bis +0,70 % | -3,42 % bis +2,70 % |
| | JJA | -5,57 % bis +2,16 % | -10,02 % bis +3,57 % |
| | SON | -2,06 % bis +1,64 % | -3,55 % bis +1,49 % |
| Niederschlag | Jahresmittel | +0,8 % bis +8,3 % | -1,3 % bis +15,4 % |
| | DJF | +0,4 % bis +14,9 % | +9,2 % bis +22,2 % |
| | MAM | -6,7 % bis +10,9 % | -4,2 % bis +24,7 % |
| | JJA | -3,9 % bis +7,4 % | -14,8 % bis +8,9 % |
| | SON | +1,1 % bis +15,5 % | -5,4 % bis +24,6 % |
| Kurzwellige Nettostrahlung | Jahresmittel | -3,3 W/m ² bis +2,9 W/m ² | -7,1 W/m ² bis +3,6 W/m ² |
| | DJF | -1,1 W/m ² bis +2,5 W/m ² | -2,9 W/m ² bis -0,3 W/m ² |
| | MAM | -4,1 W/m ² bis +3,0 W/m ² | -12,4 W/m ² bis +2,2 W/m ² |
| | JJA | -7,2 W/m ² bis +7,4 W/m ² | -13,4 W/m ² bis +10,7 W/m ² |
| | SON | -2,7 W/m ² bis +1,6 W/m ² | -4,2 W/m ² bis +2,0 W/m ² |
| Langwellige Nettostrahlung | Jahresmittel | -0,2 W/m ² bis +3,0 W/m ² | +1,0 W/m ² bis +6,4 W/m ² |
| | DJF | -0,1 W/m ² bis +2,9 W/m ² | +2,1 W/m ² bis +6,3 W/m ² |
| | MAM | -0,7 W/m ² bis +2,9 W/m ² | -0,6 W/m ² bis +5,7 W/m ² |
| | JJA | -1,8 W/m ² bis +3,6 W/m ² | -1,6 W/m ² bis +8,1 W/m ² |
| | SON | -0,9 W/m ² bis +3,5 W/m ² | +1,2 W/m ² bis +7,0 W/m ² |

VERBESSERTE UND NEUE KLIMATOLOGIEN

Klimaprojektionen sind keine Vorhersagen von zukünftigen Zuständen, denn sie bauen auf Annahmen über mögliche zukünftige Entwicklungen, z. B. hinsichtlich der Entwicklung von Treibhausgasemissionen, auf. Die Plausibilität der Modellergebnisse lässt sich durch Vergleiche mit Beobachtungen oder Messungen bewerten. Modellierungsergebnisse eines Referenzzeitraums (1961 bis 1990) haben wir mit meteorologischen Messdaten (Stationsdaten, Schiffsbeobachtungen) aus diesem Zeitraum und mit Reanalysen verglichen. Die Abweichung der modellierten Daten von den gemessenen ist ein Indiz für die Qualität der Modelle.

Während auf dem Festland meteorologische Messdaten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vorliegen, mangelt es auf See daran, selbst für die Nordsee. Dies gilt für alle atmosphärischen und auch für ozeanische Parameter. Auf See gibt es lediglich sehr wenige kontinuierlich registrierende Dauermessstationen. Schiffsbeobachtungen kommen häufig von Handelsschiffen, die auf festen Schiffsrouten fahren. Sie beruhen z. T. auf Schätzungen, z. B. beim Seegang und der Wolkenbedeckung. Für flächendeckende Klimatologien, z. B. für die Nordsee, verwendet man deshalb die Beobachtungen von vielen Schiffen. Dennoch ist die räumliche und zeitliche Abdeckung der Beobachtungsdaten von Schiffen auf See meist lückenhaft. Die globalen meteorologischen Reanalysen haben für die Nordsee ein zu grobes Gitternetz. Beobachtungsdaten und Reanalysen klaffen zum Teil deutlich auseinander, weil Einflüsse des Landklimas rechnerisch bis weit auf die See „mitgeschleppt“ werden. Die Verwendung von globalen Reanalysen für regionale Studien in Nebenmeeren ist deshalb problematisch; es werden daher verbesserte Klimatologien und regionale Reanalysen für Atmosphäre und Ozean benötigt.

Zur Verbesserung der Validierung von Modellergebnissen wurden in Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg (ICDC) neue Klimatologien für die Nordsee (Atmosphäre und Ozean) erarbeitet. Messdaten wurden dazu mit bestimmten Filter- und Interpolationsverfahren aufbereitet. Diese neuen Klimatologien bieten eine deutlich verbesserte Basis für den Antrieb und für die Bewertung von regionalen Klimaprojektionen.

Zur Bewertung von Klimaprojektionen hinsichtlich der Informationen zum Vorkommen und zur Dynamik ozeanographischer Strukturen wurde auf der Basis von Satellitenbeobachtungen eine Klimatologie der ozeanischen Fronten erarbeitet. Fronten sind mesoskalige⁶ Strukturen. Sie trennen Wasserkörper mit unterschiedlichen physikalischen, chemischen, biologischen und dynamischen Eigenschaften. Fronten sind auch Bereiche erhöhter biologischer Produktivität⁷, und damit für die Ökologie bedeutsam.

REGIONALISIERTE KOPPELUNG VON OZEAN-ATMOSPHÄRE-MODELLEN

Die bislang durchgeführten Regionalisierungen für die Nordsee wurden mit ungekoppelten Modellen für Atmosphäre und Ozean durchgeführt. Dies ist insofern unrealistisch, als der Ozean nicht ausschließlich Empfänger von Klimasignalen aus der Atmosphäre ist. Vielmehr reagiert auch die Atmosphäre auf den Ozean; bisher fehlte jedoch die Rückkopplung. Zur Erarbeitung realistischerer Klimaprojektionen für die Nordsee wurde deshalb gemeinsam mit dem MPI für Meteorologie der Universität Hamburg, dem Climate Service Center und dem schwedischen Wetterdienst (SMHI) ein kleines Ensemble von regional gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen erarbeitet.

⁶ Siehe Glossar.

⁷ Für Details siehe Klein, H., 2012.

Die Ergebnisse bisher durchgeführter Versuche mit gekoppelten Modellen erscheinen deutlich realistischer als die ungekoppelter Projektionen. Trotz dieses methodischen Fortschritts verbleiben die inhärenten Ungenauigkeiten von Klimamodellen. Bisherige Ergebnisse können durch ein erweitertes Modell-Ensemble robuster werden.

Sollten sich dadurch unsere bisherigen Ergebnisse bestätigen (Tabelle 3), dann zeichnen sich deutliche Veränderungen im Ökosystem der Nordsee ab. Aus der verringerten und stabileren Deckschicht des Nordostatlantiks würden vermutlich weniger Nährstoffe in die Nordsee eingetragen werden, was einen sinkenden trophischen Zustand bewirken könnte. Veränderte Temperaturen und Salzgehalte könnten das Artenspektrum beeinflussen. Eine abgeschwächte Zirkulation würde den Transport von Sediment sowie Fisch- und anderen Larven verändern.

In Tabelle 3 sind Ergebnisse von ungekoppelten und gekoppelten regionalen Klimamodellierungen des Szenarios A1B aus KLIWAS sowie aus den Globalmodellläufen des IPCC-4-Prozesses dargestellt.

Tabelle 3: Bandbreiten der Abweichungen ozeanischer Parameter über der Nordsee vom Zeitraum 1961 bis 1990 für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2070 bis 2099).

| PARAMETER | JAHRESZEITEN | BANDBREITE DER ÄNDERUNG | |
|----------------------------------|--------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | NAHE ZUKUNFT 2021 – 2050 | FERNE ZUKUNFT 2070 – 2099 |
| Wassertemperatur (Oberfläche) | Jahresmittel | +0,7 °C bis +1,5 °C | +1,9 °C bis +2,7 °C |
| | DJF | +0,6 °C bis +1,4 °C | +1,8 °C bis +2,8 °C |
| | MAM | +0,8 °C bis +1,4 °C | +1,8 °C bis +2,6 °C |
| | JJA | +0,7 °C bis +1,7 °C | +1,8 °C bis +3,1 °C |
| | SON | +0,6 °C bis +1,7 °C | +1,6 °C bis +3,0 °C |
| Salzgehalt* | Jahresmittel | -0,01 g/g bis -0,11 g/g | -0,20 g/g bis -0,48 g/g |
| | DJF | -0,02 g/g bis -0,10 g/g | -0,20 g/g bis -0,48 g/g |
| | MAM | -0,01 g/g bis -0,12 g/g | -0,22 g/g bis -0,51 g/g |
| | JJA | -0,01 g/g bis -0,11 g/g | -0,18 g/g bis -0,48 g/g |
| | SON | 0,00 g/g bis -0,10 g/g | -0,18 g/g bis -0,43 g/g |
| Meeresspiegel** | Jahresmittel | 0,07 m bis 0,11 m | 0,20 m bis 0,25 m |
| | DJF | 0,07 m bis 0,09 m | 0,19 m bis 0,24 m |
| | MAM | 0,07 m bis 0,11 m | 0,22 m bis 0,27 m |
| | JJA | 0,07 m bis 0,11 m | 0,21 m bis 0,24 m |
| | SON | 0,07 m bis 0,10 m | 0,20 m bis 0,25 m |

* Die Werte für die Bandbreiten des Salzgehalts und des Meeresspiegels beruhen in dieser Tabelle nur auf zwei Simulationen des A1B-Szenarios; sie sind daher nicht repräsentativ für die zu erwartende Spannbreite der Modelle. Sie sind hier nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt und um die Tendenzen in der Entwicklung darzustellen.

** Für den Meeresspiegelanstieg sind in dieser Tabelle ausschließlich die in der Nordsee durch Ozeanerwärmung (sterisch) und veränderte Wind- und Strömungsdynamik verursachten Beiträge aufgeführt. Allerdings sind aus der globalen sterischen Ausdehnung, der möglichen Abschmelzung von Eisschilden (Grönland / Antarktis) und daraus folgender Änderungen von deren Anziehungskräften weitere, bislang unbekannte Werte zu berücksichtigen.

UNTERSUCHUNGEN ZUM MEERESSPIEGELANSTIEG

Der mittlere Stand des Meeresspiegels an den tidebeeinflussten und anthropogen veränderten Gebieten der Nordseeküste ist eine Größe, die aus den Wasserstandskurven der Küstenpegel errechnet wird. Der Wasserstand an einem bestimmten Ort setzt sich hauptsächlich zusammen aus der astronomischen Gezeit und dem Stau, der durch Wind erzeugt wird (Windstau). Letzter kann klimabedingt variieren.

Zu globalen Veränderungen im Stand des Meeresspiegels tragen eine Anzahl klimagesteuerter Prozesse bei. Die wichtigsten sind die thermische Ausdehnung des Ozeanwassers, das Abschmelzen von Gebirgsgletschern und Eisverluste der kontinentalen Eisschilde von Grönland und der Antarktis, einschließlich der die durch letzteres verursachten Schwerkraftveränderungen. Regionale Änderungen des globalen Anstiegs werden durch veränderte Windsysteme und die verringerten Anziehungskräfte unterschiedlich reduzierter Eisschilde verursacht. Tektonische Hebungen oder Senkungen von Küstenabschnitten bewirken eine scheinbare Änderung des Meeresspiegels. Da die Verluste der Eisschilde noch zu ungenau bestimmt werden können, sind gegenwärtige Erkenntnisse vorläufig.

Im Langzeitverhalten des mittleren Meeresspiegels (MSL) und der extremen Wasserstände wurden für den Aufzeichnungszeitraum der Tidepegel von 1900 bis 2008 in der Deutschen Bucht signifikante Schwankungen nachgewiesen: Bis in die 1950er Jahre waren die Veränderungen der Pegelstände vor allem an die Schwankungen des MSL gekoppelt. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts herrscht dagegen eine signifikant divergente Entwicklung vor; d. h., seit Ende der 1950er und seit dem Beginn der 1960er Jahre laufen die Trends des MSL und der Extremwasserstände auseinander. Während, unabhängig vom aktuellen Meeresspiegelanstieg, die extrem hohen Perzentile signifikant größere positive Trends als der MSL aufweisen, sind die niedrigeren Perzentile durch signifikant negative Trends geprägt. Demzufolge sind die Veränderungen der extremen Wasserstände nicht notwendigerweise an die Veränderungen des MSL gekoppelt. Die Projektion in die Zukunft wird dadurch erschwert. Die in Tabelle 2 dargestellten Werte zum zukünftigen Meeresspiegel beinhalten ausschließlich diejenigen Anteile, die durch die Erwärmung des Ozeanwassers und durch Veränderungen in den Wind- und Strömungsverhältnissen verursacht werden.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- Die neu entwickelten Klimatologien für die Nordsee mit räumlichen Auflösungen von ca. 0,25° für den Ozean und 1° für die Atmosphäre sowie einer zeitlichen Auflösung von einem Monat beruhen ausschließlich auf qualitätsgesicherten Beobachtungsdaten.
- Zeitlich und räumlich variierbare Teilklimatologien können erzeugt werden.
- Es können damit spezifische statistische Auswertungen für alle KLIWAS-relevanten Parameter durchgeführt werden.
- Die neu entwickelte Fronten-Klimatologie für die Nordsee beruht auf Satellitenbeobachtungen.
- Sie ermöglicht die Validierung der ozeanischen Dynamik in Klimaprojektionen.
- Die Frontenklimatologie sowie die Methodik ihrer Erstellung ist als Core Service in das europäische COPERNICUS-Programm (ehemals GMES) aufgenommen worden.

4.2 TIDEKENNWERTE UND SEEGANGSSTATISTIK (KÜSTE)

Im Forschungsprogramm KLIWAS werden gegenwärtige und zukünftige Tidekennwerte (Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub, Flutdauer und Ebbdauer) und Seegangparameter (Wellenhöhen, Wellenperioden) in Küstennähe und Nordseeästuaren untersucht. Diese werden um Höhenänderungen (siehe Kapitel 4.3) korrigiert. Diese Ergebnisse sind einerseits für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt, andererseits für weitergehende Forschungen zum Sedimenttransport (Kapitel 4.5) und zur Ökologie (Kapitel 4.11) notwendig.

Unsere Untersuchungen starten mit historischen und aktuellen Messungen der WSV und der BfG (Seegang): Diese Daten werden qualitativ gesichert, insbesondere da die Anforderung an die Qualität der Messwerte für Untersuchungen hinsichtlich des Klimawandels steigt; die Homogenität der Daten ist festzustellen. Mögliche Unsicherheiten wurden dokumentiert und Verfahren zur automatischen Qualitätssicherung wurden weiterentwickelt⁸. Testweise wurden historische Pegelmesswerte digitalisiert. Die Digitalisierung historischer Pegelmesswerte ist eine mögliche Methode, um Unsicherheiten zu bestimmen⁹ und ein vertieftes Prozessverständnis herbeizuführen. Zum ersten Mal ist die Modellkette bis in die Ästuare (insbesondere Elbe-Ästuar) heruntergebrochen worden¹⁰.

ERGEBNISSE

TIDEMITTELWASSER:

Ohne den Einfluss der Absenkung des Festlandes beträgt über die vergangenen 100 Jahre an den Mündungspegeln der Ästuare Ems, Weser und Elbe der mittlere Anstieg des mittleren Tidemittelwassers 1,1 bis 1,9 mm pro Jahr. Korrigiert um den Einfluss von Landsenkungen liegt dieser Wert bei 1,6 bis 2,9 mm pro Jahr. Eine Beschleunigung des Anstiegs des mittleren Tidemittelwassers ist an den Mündungspegeln der Ästuare Ems, Weser und Elbe für die letzten 100 Jahre nicht nachweisbar¹¹.

TIDEHOCHWASSER, TIDENIEDRIGWASSER, TIDEHUB, EBBEDAUER, FLUTDAUER

Für die vor allem für die Bemessung bedeutenden Tidekennwerte lassen sich keine allgemeingültigen (flächenhaften) Aussagen treffen. Vielmehr muss zukünftig projiziert eine individuelle Betrachtung erfolgen (Einzelgutachten). Es ist aber ersichtlich, dass die einzelnen Tidekennwerte sich anders entwickeln als der regionale Meeresspiegel (Tidemittelwasser). Das bedeutet jedoch auch, dass sich aus Aussagen zur Veränderung des Tidemittelwassers nur bedingt Aussagen zur Betroffenheit des küstenhydrologischen Systems ableiten lassen.

Je nach Standort verlängert sich die Flutdauer und verkürzt sich die Ebbdauer (z. B. Pegel Bremerhaven und Emden); dabei nimmt die Ebbstromgeschwindigkeit zu. Oder die Flutdauer wird kürzer und die Ebbdauer länger (z. B. Pegel Büsum und Cuxhaven), wobei die Flutstromgeschwindigkeit steigt (siehe auch Kapitel 4.4).

PHASENVERSCHIEBUNGEN DER TIDEKENNWERTE

Durch den Anstieg des Tidemittelwassers ändert sich möglicherweise regional die Gewässersohle, doch generell vergrößert sich die mittlere Wassertiefe; dieses führt zu einer

8 Für Details siehe Hein et al., 2010 und Jennings et al., 2012a, b.

9 Für Details siehe Hein et al., 2012a.

10 Für Details siehe Hein et al., 2011c und Hein et al., 2012b.

11 Für Details siehe Hein et al., 2011a.

Verkürzung der Laufzeit der Tidekurve. Beispielsweise zeigt sich, dass sich im säkularen Mittel die Laufzeit von Borkum (Ems-Mündung) bis zum Leuchtturm Alte Weser (Weser-Mündung), bezogen auf Tidehochwasser um ca. 3 min pro 100 Jahre verkürzt hat und bezogen auf das Tideniedrigwasser um ca. 23 min pro 100 Jahre verkürzt hat. Dieses lässt sich im Mittel aus den Tidekennwerten ableiten. Gegenläufige Trends bei anderen Pegeln und insbesondere im Tideniedrigwasser zeigen aber auch eine mögliche Verformung der Tidekurve. Erste Untersuchungen der teilweise digitalisierten Pegelbögen zeigen Änderungen der einzelnen Partialtiden. Flächendeckende Untersuchungen der langfristigen Verformung der Tidekurve sind derzeit nicht möglich, da hochauflösende Wasserstandsaufzeichnungen meistens nur auf analogen Pegelbögen vorliegen, umfangreiche weitere Digitalisierungen wären notwendig.

VARIABILITÄT

Die Zeitreihen der gemessenen Tidewasserstände zeigen Variabilitäten auf kurzen und langen Zeitskalen¹². Während die regionalisierten Klimamodelle kurzskalige Prozesse gut widerspiegeln, zeigen sich in Bezug auf langskalige Variabilitäten Defizite. Für belastbare Aussagen über Veränderungen der Tidekennwerte ist immer mindestens ein Nodaltidezyklus (18,61 Jahre) einzubeziehen. Es kann ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem Tidemittelwasser und der Nordatlantischen Oszillation festgestellt werden¹³.

ZUKÜNFTIGE ÄNDERUNG DER TIDEKENNWERTE

Zum ersten Mal ist die KLIWAS-Modellkette bis in die Ästuare (insbesondere Elbe-Ästuar) heruntergebrochen worden¹⁴. Somit können wir den Einfluss der Veränderung für wichtige Bemessungs- und Managementansätze auf Basis der Veränderung der gewässerkundlichen Statistik abschätzen. Ergebnisse zeigen eine Verformung der Tidekurve durch Änderungen der Partialtiden und somit eine räumlich inhomogene Änderung der Tidekennwerte (Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub, Ebbdauer, Flutdauer). Die Änderungen durch die Nodaltide wurden berücksichtigt. Auch für zukünftige Änderungen sind projiziert individuelle Betrachtungen vonnöten (Einzelgutachten).

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *An den Mündungspegeln der Ästuare Ems, Weser und Elbe ergibt sich für die letzten 100 Jahre ein Meeresspiegelanstieg von 11 bis 17 cm.*
- *Der Tidehochwasserstand stieg an diesen Pegeln um ca. 23 cm bis 33 cm pro 100 Jahre.*
- *Gleichzeitig hat sich das Tideniedrigwasser um +26 cm bis -19 cm verändert.*
- *An den Pegeln Bremerhaven und Emden verlängert sich die Flutdauer und verkürzt sich die Ebbdauer.*
- *An den Pegeln Büsum und Cuxhaven verlängert sich die Ebbdauer, während sich die Flutdauer verkürzt.*
- *Bei der Seegangsstatistik an der Nordseeküste ist derzeit keine signifikante Änderung nachzuweisen.*

¹² Für weitere Details siehe Hein et al., 2011b.

¹³ Für weitere Details siehe Dangendorf et al., 2012.

¹⁴ Für Details siehe Hein et al., 2011c, Hein et al., 2012b.

SEEGANG

Mittels Transferfunktionen zwischen Wellenmessungen, Windmessungen und der Modellkette lässt sich ein Einfluss der Klimaänderung auf das Wellengeschehen hinreichend genau abbilden¹⁵. Aussagen können lediglich für jene wenigen Messpunkte getroffen werden, für die die entsprechenden Daten vorliegen. Derzeitige Formeln zur Bemessung von Seebauwerken auf Seegang unterschätzen zum Teil die bemessungsrelevante Wellenhöhe¹⁶.

SALZGEHALTE (WESER)

Die historischen Salzgehalte des Weser-Ästuars zeigen eine Änderung in den letzten 100 Jahren. Die Ursachen scheinen vielfältig; neben dem Klimawandel sind lokale Baumaßnahmen, der Bau von Wasserspeichern und auch die Einleitung von Salzen in die Weser durch den Bergbau für Änderungen verantwortlich.

4.3 GEODÄTISCHE BEITRÄGE ZU KLIWAS

Für eine bessere Bewertung der Ergebnisse zum Meeresspiegelanstieg sind die Aufzeichnungen der Pegel, insbesondere aber die Referenzierung der Pegelnullpunkte zu analysieren. In der Vergangenheit erfolgten z. T. Korrekturen der Höhen der Pegelnullpunkte in der Art, dass die physischen Pegelnullpunkte, d. h. die Pegellatten verschoben wurden. Für die Ableitung langfristiger Trends ist es notwendig, entsprechende Veränderungen anhand der Pegelakten zu erfassen und die Wasserstandszeitreihen entsprechend zu korrigieren.

Neben den Veränderungen der Pegelnullpunkte durch Verschiebungen der Pegellatten sind bei Analysen zum Meeresspiegelanstieg auch vertikale Landbewegungen zu berücksichtigen. Aufgrund entsprechender Bewegungen senkt oder hebt sich das Land samt der darauf installierten Pegel. Die Pegel „tauchen“ somit tiefer oder flacher in das Wasser ein, weshalb am Pegel scheinbare Wasserstandsänderungen erfasst werden. Eine Ableitung entsprechender Höhenänderungen auf Basis amtlicher Höhen der Landesvermessung ist nicht möglich. Aus diesem Grund wurden von Seiten der BfG GNSS-Sensoren¹⁷ installiert, die ein Monitoring entsprechender Bewegungen ermöglichen. Erste Ergebnisse (siehe Tabelle 4) zeigen je nach Station mehr oder weniger ausgeprägte Änderungen (z. B. Borkum Fischerbalje: Mai 2009 bis April 2011 Änderung um -1,4 mm pro Jahr), wobei diese aufgrund der kurzen Zeitreihen derzeit als noch nicht signifikant einzustufen sind.

¹⁵ Für Details siehe Rütten et al., 2013.

¹⁶ Für Details siehe Mai et al., 2010.

¹⁷ GNSS = Global Navigation Satellite System.

Tabelle 4: Höhen und Höhenänderungen an ausgewählten GNSS-Pegelstationen

| ERGEBNISSE IM IGS05 | | | | | | |
|----------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Station | Epochen | Ellip. Höhe 2008–2010 | | Amplitude | Linearer Trend | Standardabweichung der Residuen [mm] |
| | | Mittelwert [mm] | Standardabweichung [mm] | jährliche Schwankung [mm] | ohne jährliche Schwankung [mm/Jahr] | |
| HOE2 (Hörnum) | 170 | 62,728 | 2,8 | n.n. | -0,1 | 3,1 |
| HELG (Helgoland) | 170 | 48,406 | 3,5 | n.n. | 0,2 | 3,7 |
| TGKN (Knock) | 128 | 53,419 | 2,8 | 2,1 | -1,4 | 3,0 |
| FLDW (Unterfeuer Dwarsgat) | 140 | 58,990 | 2,9 | 2,7 | -0,7 | 3,3 |
| LHAW (LT Alte Weser) | 128 | 68,262 | 3,3 | 3,5 | -0,4 | 4,0 |
| TGCU (Pegel Cuxhaven) | 122 | 48,796 | 3,1 | n.n. | 0,7 | 3,3 |
| TGBF (Borkum Fischerbalje) | 102 | 48,765 | 2,5 | n.n. | -1,4 | 2,7 |
| TGBU (Büsum) | 100 | 51,209 | 2,5 | 2,6 | -1,0 | 2,4 |

Neben den Pegeln bietet die Satellitenaltimetrie eine vollkommen unabhängige Möglichkeit zur Erfassung der Meeresspiegelhöhe. Ausgehend von Satelliten wird die Meeresoberfläche im Intervall von maximal 10 Tagen vermessen und flächenhaft beschrieben. Die punktuellen und zeitlich hoch aufgelösten Pegelbeobachtungen ergänzen sich zu den flächenhaften Altimeterbeobachtungen sehr gut. Im Rahmen durchgeführter Analysen wurde festgestellt, dass beide Systeme ein sehr hohes Maß an Übereinstimmung aufweisen (wenige cm), sofern direkte Pegel und Altimeterbeobachtungen im Ist-Zustand miteinander genutzt wurden. Die allgemein übliche Vorgehensweise der Korrektur von Gezeiten und Verdrängungseffekten auf Basis von Modellen ist nicht zielführend, da im Bereich der deutschen Küsten die Korrekturmodelle die Realität nicht hinreichend genau beschreiben.

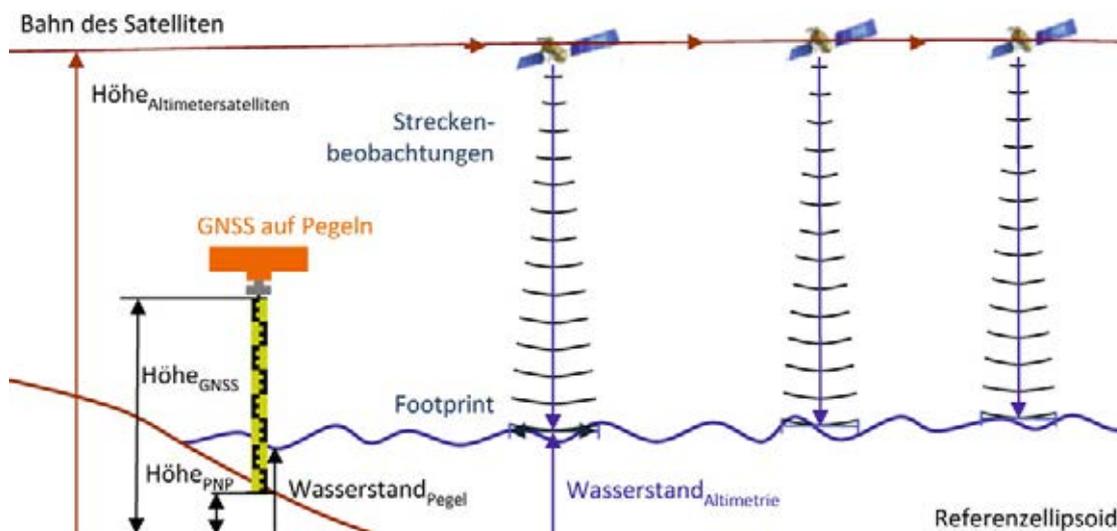


Abbildung 2: Prinzip der Altimetrie

4.4 AUSWIRKUNGEN AUF HYDRODYNAMIK IN NORDSEEÄSTUAREN UND OSTSEE UND UNTERSUCHUNGEN ZU ANPASSUNGSOPTIONEN

Die deutschen Küsten von Nord- und Ostsee einschließlich der Ästuarare werden in weiten Bereichen als Seeschiffahrtsstraßen genutzt. Durch den Klimawandel kann die Schifffahrt und der Zustand der Seeschiffahrtsstraßen erheblich beeinflusst werden. Unterschiedliche Betroffenheiten können entstehen. Stichworte in diesem Zusammenhang sind: Deichsicherheit, Sicherheit der Ufer und Bauwerke, Vorflut-Funktion von Wasserstraßen, Veränderung der Wasserstände, Zunahme der Strömungen, Verlagerung der Brackwasserzone, veränderte Sedimentumlagerungen mit der damit verbundenen Zunahme der Nassbaggermengen, sowie veränderte nautische Zugangsbedingungen zu den Häfen.

Daraus ergeben sich Konsequenzen für Betrieb, Unterhaltung und Ausbau der Seeschiffahrtsstraßen. Deshalb ist das zukünftige Management für die Reviere auf wissenschaftliche Erkenntnisse angewiesen. Politische Weichenstellungen für die langfristige Entwicklung des Seeverkehrs erfordern rechtzeitig erarbeitete, fachlich gesicherte Grundlagen.

UNTERSUCHUNGSKONZEPT

Für die Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen ist eine entsprechende Bandbreite möglicher Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Hierfür werden in Sensitivitätsstudien die Parameter Meeresspiegelanstieg, Oberwasserzufluss und Windgeschwindigkeit variiert, um Betroffenheiten zu ermitteln. Im zweiten Schritt wird die Wirkung von Anpassungsoptionen mit denselben Parametern modelliert.

Diese Sensitivitätsstudien führen wir mithilfe dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle der Nordseeästuarare von Elbe, Jade-Weser und Ems sowie der Ostsee durch. Auf der Grundlage unserer Studien können wir folgende Aussagen ableiten:

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Bedingt durch einen Meeresspiegelanstieg steigt das Tidehochwasser stärker als das Tideniedrigwasser.*
- *Die Flutstromdominanz nimmt zu.*
- *Der stromaufgerichtete Sedimenttransport erhöht sich.*
- *Die Brackwasserzone verschiebt sich stromauf.*
- *Reduzierte Oberwasserzuflüsse können kurzfristig stärker zur stromaufgerichteten Verschiebung der Brackwasserzone beitragen als der Meeresspiegelanstieg. Die Veränderungen durch den Meeresspiegelanstieg sind jedoch dauerhaft.*
- *Während zukünftiger Sturmfluten können höhere Scheitelwasserstände auftreten.*

NORDSEEÄSTUARE

Ein möglicher Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Nordsee führt in den Ästuarare (Elbe, Jade-Weser, Ems) zu einer stärkeren Anhebung des mittleren Tidehochwassers als des mittleren Tideniedrigwassers (siehe Kapitel 4.2). Der Tidehub nimmt zu. Die Form der Tidekurve verändert sich. Die Flutstromgeschwindigkeiten nehmen in den meisten Bereichen stärker zu als die Ebbestromgeschwindigkeiten (eine Ausnahme bilden Teile der Unterems). Durch eine verstärkte Flutstromdominanz (siehe Kapitel 4.2) erhöht sich der stromaufgerichtete Sedimenttransport. Die Trübungszone sowie die Brackwasserzone werden stromauf verschoben¹⁸.

Lang anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse der genannten Flüsse können einen deutlich größeren Effekt auf die Verschiebung der Brackwasserzone nach stromauf haben

¹⁸ Für Details siehe Holzwarth et al., 2011.

als ein Meeresspiegelanstieg. Bei sehr lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen verschiebt sich die Brackwasserzone nach einer bestimmten Zeit nicht mehr weiter stromauf. Die Veränderung durch den Meeresspiegelanstieg auf die Brackwasserzone wird stetig und dauerhaft sein, während durch variierende Oberwasserzuflüsse kurzfristige Verschiebungen der Brackwasserzone auftreten.

Das hydrodynamisch-numerische Modell der BAW zur Simulation des Feststofftransports in der Tideelbe wurde für die Untersuchung des Transports schadstoffbelasteter Feinsedimente erweitert. Mit ersten Modellläufen können die im Längsverlauf der Tideelbe in Richtung See abnehmenden Schwermetallkonzentrationen, die aus Langzeitmessungen der FGG Elbe und der BfG bekannt sind, abgebildet werden. Auch die Konzentrationsniveaus ausgewählter Schwermetalle entsprechen im Wesentlichen den gemessenen Werten. Die Modellierung bestätigt damit die aus den Messdaten abgeleitete, in Richtung Meer zunehmende Vermischung höher belasteter fluvialer Sedimente, mit gering belasteten marinen Sedimenten (siehe Kapitel 4.5). Das Modell ermöglicht es, Aussagen über die künftige Entwicklung der stattfindenden Transportprozesse unter ausgewählten geänderten Randbedingungen zu treffen. So wurde im Modell ein Meeresspiegelanstieg, der zu einer Verstärkung des stromaufgerichteten Sedimenttransports und damit zu einer Zunahme des Anteils geringer belasteter mariner Sedimente führt, angenommen. Unter dieser Randbedingung ist bei sehr hohem Oberwasserzufluss eine leichte Verringerung der Schadstoffkonzentrationen, bei niedrigen Oberwasserzuflüssen eine noch geringere Abnahme zu erwarten, da die marinen Sedimente das Transportgeschehen bereits dominieren. Eine umfassende Sensitivitätsstudie, die u. a. die für die Elbe projizierten Oberwasserzuflüsse (siehe Kapitel 5.2) und Schwebstoffeinträge in das Elbe-Ästuar (siehe Kapitel 5.3) zugrunde legt, ist im Rahmen von KLIWAS nicht mehr möglich.

STURMFLUTEN

Um gezielt die Auswirkungen des Klimawandels auf Sturmfluten zu betrachten, haben wir Simulationen historischer Sturmfluten in Kombination mit unterschiedlichen Meeresspiegelanstiegen, hohen Oberwasserzuflüssen oder einer Zunahme von Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Die betrachteten Szenarien führen zu einer Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände, einer früheren Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes sowie einer längeren Dauer hoher Wasserstände. Die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes wird im Mündungsbereich durch das Geschehen in der Nordsee, d. h. den Meeresspiegelanstieg, verändert. Im mittleren bis oberen Bereich der Ästuarie beeinflussen sowohl der Meeresspiegelanstieg als auch das Geschehen im Binnenbereich, d. h. der veränderte Oberwasserzufluss, den Sturmflutscheitelwasserstand. Oberhalb des Wehrs, welches bei Sturmflut gelegt wird, bestimmt hauptsächlich der Oberwasserzufluss die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstands¹⁹.

OSTSEE

Weiterhin haben wir Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs für die Ostsee untersucht. So verändert der derzeit bis 2100 zu erwartende Meeresspiegelanstieg die Dynamik der Wasserstände (z. B. durch Seiches²⁰ oder Windstau) in der Ostsee nicht signifikant; es erfolgt lediglich eine Erhöhung des mittleren Wasserstands. Ausnahmen bilden Binnenreviere, in die die Variabilität der Wasserstände der Ostsee gedämpft eindringt. Erste Analysen weisen darauf hin, dass in diesen Revieren die Dämpfung aufgrund der Vergrößerung des Querschnittes der Mündung abnimmt. Die Folge ist eine Zunahme

¹⁹ Für Details siehe Rudolph et al., 2012.

²⁰ Siehe Glossar.

der Schwankungsbreite des Wasserspiegels. Betroffen sind die Reviere Schlei, die Bodengewässer und das Stettiner Haff. Detaillierte Simulationen der Schlei zeigen, dass dort der Meeresspiegelanstieg zu einem verstärkten Austausch mit dem Ostseewasser führt. Dies hat einen stärkeren Eintrag von Salzwasser und einen stärkeren Austausch von Schad- und Nährstoffen zur Folge.

ANPASSUNGSOPTIONEN

Die Analysen zu den Folgen des Klimawandels zeigen, dass sich Herausforderungen, die schon heute an den Bundeswasserstraßen bestehen, durch den Klimawandel vermutlich vergrößern werden. Ziel der Untersuchung von Anpassungsoptionen ist, bestehende Maßnahmen zu überprüfen und zu verbessern sowie neue Anpassungsoptionen zu entwickeln. Mithilfe der hydrodynamisch-numerischen Modelle der Ästuarie Elbe, Jade-Weser und Ems untersuchen wir die Wirksamkeit von Anpassungsoptionen.

Zur nachhaltigen Verminderung des seeseitigen Schwebstoffeintrags in die Unterems wird im Rahmen des Aktionsprogramms Ems eine Sohlschwelle am Emssperrwerk untersucht. Wir stufen diese Maßnahme auch für mögliche zukünftige Klimaverhältnisse als geeignet ein. Sowohl bei ansteigendem Meeresspiegel als auch bei lang anhaltendem niedrigem Oberwasserzufluss zeigt die Sohlschwelle eine Wirkung, die den Nettoschwebstofftransport vermindert und die Brackwasserzone stromab verschiebt.

Derzeitige Ergebnisse in Kürze:

- *Einem möglichen Verlust der Wattflächen sollte entgegengewirkt werden.*
- *Sturmflutsperrwerke schützen das Hinterland effektiv. Auf der Seeseite des Sturmflutsperrwerks können jedoch erhöhte Wasserstände auftreten.*
- *Einengende Maßnahmen im Mündungsbereich von Ästuaren können den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf Sturmflutscheitelwasserstände reduzieren.*

Sensitivitätsstudien zu Topographieveränderungen im Elbmündungsbereich aus dem Forschungsprojekt KLIMZUG Nord zeigen, wie wichtig die Watten für die Tidedynamik des gesamten Elbe-Ästuars sind. Einem möglichen Verlust der Wattflächen sollte unbedingt entgegengewirkt werden. Die Watten stützen das Tideniedrigwasser. Durch einen Verlust der Watten würde sich die Flutstromdominanz verstärken. Die Brackwasserzone würde sich zusätzlich stromauf verlagern und der stromaufgerichtete Netto-Schwebstofftransport erhöhen.

Schutz vor Sturmfluten bieten Sturmflutsperrwerke. Insbesondere bei Meeresspiegelanstieg schützen Sperrwerke das Hinterland effektiv vor erhöhten Sturmflutscheitelwasserständen. Die Scheitelwasserstände stromauf des Sperrwerks hängen vom Oberwasserzufluss, vom Schließzeitpunkt des Sperrwerks und der Schließdauer des Sperrwerks ab. In den ungeschützten Bereichen auf der Seeseite des Sperrwerks nimmt der Scheitelwasserstand dagegen durch den Meeresspiegelanstieg zu. Zusätzlich können dort durch das Sperrwerk selbst erhöhte Scheitelwasserstände auftreten. Das Emssperrwerk bei Gandersum schützt bereits heute die Ems vor Sturmfluten. Unsere Simulationen zeigen, dass es bis zu einem gewissen Grad auch unter zukünftigen Klimabedingungen ausreichend Schutz bieten wird. Im Mündungsbereich der Weser (südlich von Bremerhaven) untersuchen wir ein Sturmflutsperrwerk als Anpassungsoption. In Abhängigkeit des Schließzeitpunktes kann das Sperrwerk in der Weser eine Sunk- und Schwallwelle auslösen, die sich bis in das Elbe-Ästuar ausbreitet.

Als Schutz vor Sturmfluten untersuchen wir alternativ zum Sperrwerk einengende Maßnahmen im Mündungsbereich der Elbe, die die Scheitelwasserstände dämpfen sollen. Der Grad der Dämpfung ist dabei abhängig vom Grad der Einengung des hydraulisch wirksamen Fließquerschnitts und der Lage. Im inneren Mündungsgebiet ist der Grad der Einengung ein und derselben Maßnahme größer als im äußeren Bereich. Bedingt durch die Verringerung des wirksamen Fließquerschnitts steigen die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Maßnahme deutlich an. Während Sperrwerke Sturmfluten vollständig kehren können, reduziert diese Maßnahme den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf die Sturmflutscheitelwasserstände nur teilweise.

Das Konzept der Sensitivitätsstudien hat sich bewährt und bietet die Möglichkeit, konkrete Wenn-Dann-Aussagen zu formulieren. In Zusammenarbeit mit der WSV ist es möglich, trotz großer Unsicherheiten in den Klimaprojektionen Aussagen zu Betroffenheiten und Anpassungsoptionen zu treffen.

4.5 NORDSEEÄSTUARE: SEDIMENTHAUSHALT UND SCHADSTOFFE

Die Nordseeästuarie werden für unterschiedliche gesellschaftsrelevante Zwecke genutzt. Einer dieser Zwecke ist die Schifffahrt; über die Seehäfen werden Exporte und Importe der deutschen Wirtschaft abgewickelt. Um die Schifffahrt leicht und sicher zu ermöglichen, werden jährlich ca. 35 Mio. m³ Sedimente aus den Fahrrinnen entnommen und überwiegend im Gewässer wieder untergebracht.

Quelle: www.wsa-bremerhaven.wsv.de/bau_und_unterhaltung/nassbaggerei/Kompetenzfeld_Nassbaggerei/

Daraus resultierte für uns die Frage, ob der Klimawandel die Baggermaßnahmen in Bereichen mit sandigen oder feinkörnigen Sedimenten in quantitativer oder qualitativer (Schadstoffe) Hinsicht beeinflussen könnte.



Um diese Frage beantworten zu können, haben wir für die Tideelbe²¹ (siehe Abbildung 3) die für die Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf den Sedimenthaushalt notwendigen Analysewerkzeuge weiterentwickelt. Unter anderem haben wir die Software *Rheno Bedform Tracking* entwickelt, mit deren Hilfe wir die Dynamik der Transportkörper in Ästuaren analysieren können.

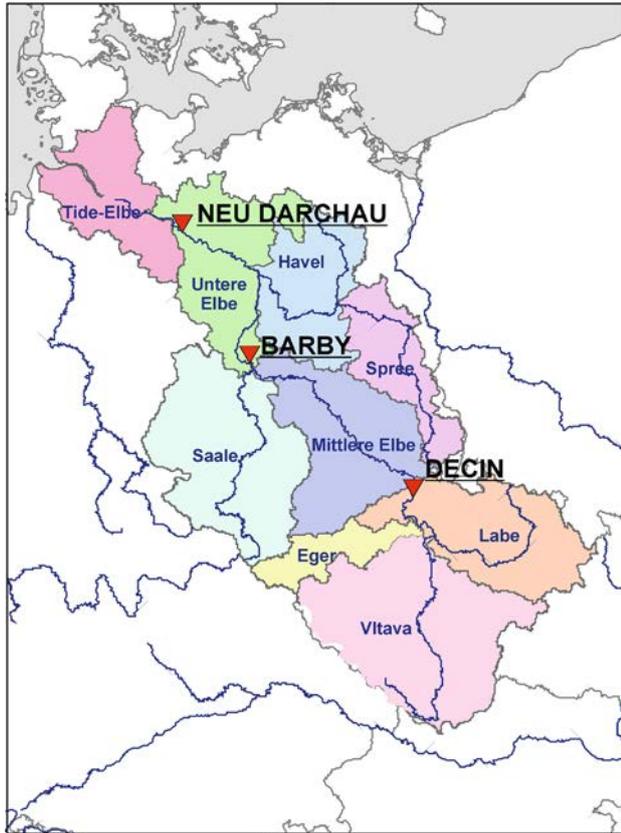


Abbildung 3: Einzugsgebiet der Elbe mit Pegeln (rote Dreiecke)

Dieses Werkzeug wird seit Anfang 2013 durch die Wasser- und Schifffahrtsämter Hamburg und Cuxhaven in der Praxis eingesetzt.

Parallel dazu haben wir die Wirkung von Einflussgrößen wie dem Oberwasserzufluss anhand von Messzeitreihen im Ist-Zustand untersucht. Wir konnten zum Beispiel zeigen, dass über Wochen anhaltende Niedrigwasserperioden zu ansteigenden Baggermengen führen. Erste Projektionsrechnungen für den Oberwasserzufluss an der Elbe liegen seit Februar 2013 vor. Diese Ergebnisse werden wir nun bis zum Projektende in die weiteren Analysen der Sedimentdynamik der Tideelbe integrieren. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass ein klimabedingt veränderter Oberwasserzufluss die Wanderungsrichtung und -geschwindigkeit von Dünen (sogenannte Transportkörperstrukturen) beeinflusst.

Diese Dünen prägen die Gewässersohle großer Abschnitte der Fahrrinne stromauf von Brunsbüttel. Ein Einfluss von Oberwasserzufluss auf die Größenentwicklung dieser Dünen konnte jedoch anhand der vorliegenden Daten nicht festgestellt werden. Daher wird auch zukünftig der Unterhaltungsaufwand durch den Klimawandel für die Baggerung von Einzeluntiefen unverändert bleiben.

Ferner haben wir für die Tideelbe durch Messungen aufgezeigt, wie der Oberwasserzufluss die Transportrichtung und das Verhältnis der Schwebstofffrachten bei Ebbe und Flut beeinflusst. So kommt es beispielsweise im Elbe-Ästuar oberhalb von Stade in den Baggerschwerpunkten bei lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen zu einer verstärkten Ablagerung schwebstoffbürtiger Sedimente. Unter diesen Bedingungen sind zum einen die aus der Binnenelbe eingetragenen partikelgebundenen Schadstoffmengen gering, und zum anderen sind die zu baggernden Ablagerungen mit großen Mengen stromauf transportierter, gering belasteter Sedimente marinen Ursprungs durchmischt (siehe unten). Daher zeigen diese Ablagerungen nur geringe Schadstoffgehalte.

Für anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse lassen sich in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) keine klaren Änderungen erkennen. Für die ferne Zukunft werden diese häufiger und länger anhaltend auftreten (siehe Kapitel 5.2). Für diesen Zeitraum können unsere Ergebnisse der Sensitivitätsstudie relevant werden.

²¹ Tidebeeinflusster Bereich der Elbe, Elbe-Ästuar.

Bei Baggermaßnahmen zu entnehmende Sedimente sind hinsichtlich ihrer Qualität zu bewerten und unter Berücksichtigung ihrer Schadstoffbelastung andernorts zu verbringen. Statistische Auswertungen unserer langjährigen Monitoringdaten aus den Nordsee-Ästuaren von Elbe, Weser und Ems zeigen für feststoffgebundene, d. h. an Schwebstoffe und feinkörnige Sedimente gebundene, Schadstoffe mit Hauptquellen im Binnenbereich (fluviale Sedimente) eine Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss. Bei steigenden Oberwasserzuflüssen und damit steigenden Schwebstoffeinträgen aus dem Binnenbereich nehmen die feststoffgebundenen Schadstoffgehalte im Ästuar zu.

Klimabedingt veränderte Schwebstoffeinträge aus Binnenflüssen in Ästuare führen so zu veränderten feststoffgebundenen Schadstoffgehalten. Anhand einer Sensitivitätsanalyse haben wir die Vermischung hoch belasteter fluvialer Feststoffe mit gering belasteten Feststoffen mariner Herkunft abgeschätzt. Für die Tideelbe wurden Ergebnisse aus Projektionen der Schwebstofffrachten bei Hitzacker (Binnenelbe) verwendet (siehe Kapitel 5.3), wobei diese als Einträge von Schwebstoffen und damit von feststoffgebundenen Schadstoffen ins Ästuar angenommen wurden. Für die Abschätzung der Schadstoffgehalte wurde die Menge der marinen Sedimente konstant gehalten.

Für eine *Worst-Case*-Abschätzung der Veränderung der Schadstoffgehalte wurde die Projektion²² mit der stärksten Erhöhung der Jahresschwebstofffracht unter mittleren Abflussbedingungen zugrunde gelegt. Mit einer solchen Erhöhung der Schwebstoffeinträge ist eine Zunahme der Schadstoffgehalte im Ästuar in der fernen Zukunft um +10 bis +30 Prozent anzunehmen.

Die mit diesem Modelllauf für die nahe Zukunft projizierte Veränderung der Schwebstofffrachten lässt eine Erhöhung der Schadstoffgehalte innerhalb der natürlichen Variabilität erwarten. Drei weitere der insgesamt 8 Modellläufe für Schwebstofffrachten lassen ebenfalls eine lediglich leichte Zunahme der Schadstoffgehalte im Elbe-Ästuar innerhalb der natürlichen Variabilität erwarten.

Weitere Simulationen für die Tideelbe, die alle für mittlere Abflussbedingungen durchgeführt wurden, zeigen Abnahmen der jährlichen Schwebstofffrachten und damit der Schadstoffeinträge ins Ästuar, die dann auch zu abnehmenden feststoffgebundenen Schadstoffgehalten führen. Die Menge mariner Sedimente wurde bei der Berechnung der Schadstoffgehalte als konstant angenommen. Auswirkungen auf die Schadstoffgehalte in Sedimenten durch Änderungen des Stromauftransports aufgrund eines angenommenen Meeresspiegelanstiegs wurden mit einer numerischen Simulation betrachtet (siehe Kapitel 4.4). Die Berechnungen zum Schadstoffeintrag in die Tideelbe setzen voraus, dass die Schadstoffmengen im Binnenbereich der Elbe konstant bleiben. Eventuelle Sanierungsmaßnahmen oder der biologische Abbau von organischen Schadstoffen sind nicht in die Berechnungen eingegangen.

Fazit: Die Bandbreite der Schadstoffentwicklungen des Elbe-Ästuars liegt mit den von uns betrachteten Projektionen bei -25 bis +30 Prozent.

Für die Weser und die Ems sind keine Projektionen zu klimabedingten Änderungen der Schwebstofffrachten vorhanden. Für die Sensitivitätsanalyse haben wir daher eine Frachterhöhung in Anlehnung an die *Worst-Case*-Betrachtung für die Elbe angenommen. An der Weser und der Ems kommt es damit unter hohen Abflussbedingungen zu einer Erhöhung der Schadstoffgehalte um +1 bis +20 Prozent.

22 Projektion: C20-A1B_EH5r3_RE-ENS_Is_wendling_Larsim.

Die Gehalte einiger Schadstoffe in zu baggernden Sedimenten aus Bereichen innerhalb und stromauf der Trübungszone der Tideelbe (bis zum Baggerbereich Osteriff) überschreiten die oberen Richtwerte der derzeit gültigen Regelungen für den Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern seewärts der Süßwassergrenze (GÜBAK 2009).

Das Worst-Case-Szenario unserer Sensitivitätsanalyse zeigt für die ferne Zukunft, dass vor allem in diesen Bereichen erhöhte Schadstoffgehalte und damit verstärkte Richtwertüberschreitungen nicht auszuschließen sind. In diesem Fall wäre zu prüfen, ob eine Anpassung der Baggergutunterhaltung erforderlich würde. Die Ergebnisse der übrigen Modellläufe für Schwebstoffeinträge lassen dagegen keine Einschränkungen der Baggergutunterhaltung erwarten. Für die Tideweser und Tideems sind auch bei Erhöhung der Schwebstoffeinträge aus den Binnenabschnitten keine Richtwertüberschreitungen zu erwarten. Lang anhaltend hohe Oberwasserzuflüsse führten jedoch zu erhöhten Schadstoffeinträgen in alle Ästuar und weiter zu einem verstärkten Schadstoffeintrag in die Nordsee.

Anthropogene Änderungen in den betrachteten Flüssen können schnellere und unter Umständen stärkere Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung als der Klimawandel haben. Sanierungsmaßnahmen im Binnenbereich lassen z. B. eine größere Verringerung der Schadstoffgehalte in den Sedimenten bzw. Schwebstoffen der Ästuar erwarten als die Effekte einer Erhöhung des Meeresspiegels. Außerdem können Maßnahmen des Sedimentmanagements die Schadstoffgehalte deutlich beeinflussen.

In strömungsberuhigten Bereichen der Ästuar von Weser und Elbe sind z. T. größere Mengen schadstoffbelasteter Sedimente abgelagert, die durch den Klimawandel potenziell mobilisierbar sind. In den meisten der untersuchten Bereichen weisen Schadstoffmessungen in Sedimentkernen jedoch auf eine Tendenz zur Sedimentation hin. Eine klimabedingte Mobilisierung der belasteten Sedimentschichten ist wenig wahrscheinlich.

Derzeit wird eine Sensitivitätsanalyse für die Tideelbe auf der Basis statistischer Modelle durchgeführt, die die Belastbarkeit der Aussagen verbessern wird.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Veränderte Oberwasserzuflüsse in der Tideelbe beeinflussen die Wanderrichtung und -geschwindigkeit von Dünen, nicht jedoch deren Höhe. Folglich bleiben die Baggermengen aus der Unterhaltung dieser sandigen Einzeluntiefen konstant.*
- *Lang anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse und ein Meeresspiegelanstieg bewirken in der Tideelbe verstärkte Sedimentablagerungen überwiegend marinen Ursprungs. Die Schadstoffgehalte in den zu baggernden Sedimenten werden demnach nicht steigen.*
- *Häufigere Hochwasserereignisse können steigende Schwebstoff- und Schadstoffeinträge in die Ästuar Elbe, Weser und Ems sowie in die Nordsee bewirken. Damit sind erhöhte Schadstoffgehalte im Baggergut, vor allem an der Elbe, möglich.*
- *Maßnahmen zur Minderung der Schadstoffbelastung im Binnenbereich zeigen schnellere und stärkere Auswirkungen in den Ästuar als klimabedingte Änderungen. Auch Maßnahmen des Sedimentmanagements können einen starken Einfluss auf Sedimenthaushalt und Sedimentqualität haben.*

4.6 WASSERBAUMATERIALIEN

Wasserbaumaterialien sind ein integraler Bestandteil beim Bau und in der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen. Sie können verschiedene organische und anorganische Schadstoffe enthalten. Eine systematische Auseinandersetzung mit dem Thema Wasserbaumaterialien im Hinblick auf die Gewässerchemie und die Freisetzung von Schadstoffen lag bislang nicht vor. Aus diesem Grund wurde ein möglicher Einfluss von Baumaterialien auf die gewässerchemische Qualität von Fließgewässern untersucht. Dies geschah vornehmlich unter den Annahmen klimabedingter hydrologischer Veränderungen. Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage war zuerst die Ausarbeitung methodischer und analytischer Grundlagen unabdingbar. Deshalb wurde im Laborexperiment untersucht, inwieweit klimarelevante Parameter wie der Salzgehalt, die Wassertemperatur oder der pH-Wert die Freisetzung von Schadstoffen aus Wasserbaumaterialien begünstigen können. Hierfür haben wir Methoden entwickelt, die insbesondere auf das Langzeitverhalten von Wasserbaumaterialien abzielen.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Die Freisetzung von Metall(oid)en aus Wasserbaumaterialien wird durch steigende Salzgehalte und geringere pH-Werte begünstigt. Die Wassertemperatur spielt eine untergeordnete Rolle.*
- *Aus Sicht der Gewässerchemie kann gefolgert werden, dass hinsichtlich der untersuchten Parameter (Ionenstärke, pH, Temperatur) keine Anpassung der Unterhaltungskonzepte der WSV notwendig erscheint. Deutlich wichtiger für die Freisetzung von Metallen und Metalloiden sind grundsätzlich die Wahl der Materialien und der Einbauort.*
- *Baustoffe emittieren relevante und messbare Mengen an Bioziden, die entweder direkt oder über Kläranlagen in die Fließgewässer gelangen und dort zu UQN-Überschreitungen führen können. Dieser Faktor könnte bei zunehmender klimabedingter Erwärmung noch problematischer werden.*
- *Ein direkter Handlungsbedarf wird für die WSV noch nicht gesehen, da die untersuchten Biozide primär aus Baustoffen des terrestrischen Bereichs über die Kläranlagen in die Gewässer eingetragen werden. Allerdings ist derzeit nicht klar, ob diese Ergebnisse auf andere Zusatzstoffe von Baumaterialien übertragbar sind.*

Mit diesen Methoden konnten wir bestätigen, dass die langfristige Freisetzung von Metall(oid)en aus Wasserbaumaterialien stark von deren Bindungsform abhängt. Etablierte Methoden zur Untersuchung der Freisetzung potenzieller Schadstoffe (z. B. DIN-Verfahren) können zu materialbedingten Artefakten und zur Unterbewertung der Freisetzung führen. Die Freisetzung ausgewählter Metalle und Metall(oid)e aus den untersuchten Materialien nimmt am deutlichsten durch steigende Salzgehalte zu. Die im Zuge des Klimawandels erwarteten Wassertemperaturänderungen spielen hierbei eine untergeordnete Rolle. Unsere Ergebnisse werden zukünftig bei der gewässerchemischen Bewertung des Einbaus von Wasserbaumaterialien berücksichtigt. Ergebnisse aus KLIWAS-Modellen zu Salinitätsänderungen werden noch während der Projektlaufzeit eingebunden.

Durch steigende Mittelwerte der Jahrestemperatur ist damit zu rechnen, dass zukünftig in Bauprodukten verstärkt Biozide und UV-Stabilisatoren verwendet werden, um der Zersetzung der Bauprodukte

durch Mikroorganismen und UV-Strahlung vorzubeugen. Mit neu entwickelten nachweisstarken analytischen Methoden (Bestimmungsgrenzen: 1 Nanogramm/L) wurde untersucht, inwieweit die in Baumaterialien enthaltenen Biozide Irgarol und Terbutryn bereits heute durch Wasserbaumaterialien zu signifikanten Anteilen in Fließgewässer eingetragen werden. Diese beiden Biozide sind von hoher Bedeutung, da sie in die Liste der prioritären Schadstoffe der Wasserrahmenrichtlinie mit extrem tiefen Umweltqualitätsnormen (UQN) von 65 ng/L (Terbutryn) und 2,5 ng/L (Irgarol) aufgenommen werden

sollen und bekanntermaßen aus Baumaterialien freigesetzt werden. Neben den Wasserbaumaterialien wurden auch noch weitere mögliche Eintragsquellen (z. B. Kläranlagen) vergleichend betrachtet, da diese Biozide beispielsweise durch Freisetzung aus Regenabläufen von Häuserfassaden über die Schwemmkanalisation in die Kläranlagen gelangen können. Hierbei wurde deutlich, dass Irgarol derzeit in den großen deutschen Fließgewässern wie dem Rhein nicht und Terbutryn nur in geringen Konzentrationen bis zu 6 ng/L nachweisbar sind. In kleinen Gewässern waren beide Biozide und deren biologische Transformationsprodukte dagegen häufig anzutreffen. Die gemessenen Rückstände in den untersuchten kleinen hessischen Fließgewässern resultierten vermutlich vorwiegend vom Eintrag kommunaler Kläranlagen. Hierbei kann festgehalten werden, dass Baustoffe (entweder direkt oder über Kläranlagen) relevante und messbare Mengen an organischen Schadstoffen freisetzen können, die sogar zu Überschreitungen von UQN führen. Bei einer klimabedingten erhöhten Verwendung von Bioziden in Bauprodukten ist daher mit zunehmenden UQN-Überschreitungen bei kleinen Fließgewässern und dem Nachweis in großen Fließgewässern zu rechnen. Ob diese Ergebnisse auch auf andere organische Zusatzstoffe von Baumaterialien übertragbar sind, wird derzeit untersucht. Aus diesem Grunde werden ausgewählte Wasserbaumaterialien (z. B. Polyacrylamide, Polyurethane) auf ihr Potenzial zur Freisetzung bislang nicht identifizierter organischer Stoffe analysiert. In Bezug auf die Freisetzung der beiden ausgewählten Biozide ist zu vermuten, dass der Beitrag der Wasserbaumaterialien im Vergleich zu den Beiträgen von häuslichen Baumaterialien relativ klein ist. Ein Handeln der WSV wird derzeit nicht für erforderlich erachtet. Allerdings sollte man sich immer bewusst sein, dass bei derart tiefen UQN (2,5 ng/L) auch kleine Beiträge relevant sein können. Bei anderen Inhaltsstoffen von Baumaterialien stehen wir noch ganz am Anfang und müssen zunächst die freigesetzten Stoffe identifizieren.

4.7 KLIMARELEVANTE SCHADSTOFFE: BIOZIDE, INSEKTIZIDE, UV-FILTER

Die klimabedingt erhöhten Mittelwerte der Jahrestemperatur werden voraussichtlich zu einer Veränderung/Erhöhung des Einsatzes von Insektiziden, Herbiziden und Bioziden führen. Um den Wandel des Biozideinsatzes zukünftig verfolgen und quantifizieren zu können, wurden neue analytische Messmethoden entwickelt, um Insektizide, Herbizide, Biozide, UV-Filter²³ und Pharmaka in Sedimenten und Wasserproben im unteren Nanogramm/L-Bereich quantifizieren zu können. Zunächst wurde exemplarisch die Belastung der Nordseeküste, Binnenelbe, Elbe-Ästuar, Saale, Schwarze Elster, Havel, Rhein, Oder und zahlreicher kleinerer Binnengewässer untersucht.

Unsere Untersuchungen belegen, dass vornehmlich Abflussänderungen die Konzentrationen der organischen Schadstoffe in

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

Niedrigwasser führt zu einer Erhöhung der Belastung der Binnenwasserstraßen mit polaren organischen Schadstoffen.

- *Ein Anstieg der Wassertemperatur von +2 bis +5 °C hat a) keinen signifikanten Einfluss auf das Verhältnis der Schadstoffkonzentrationen zwischen wässriger Phase und Sediment und b) führt zu einem beschleunigten Abbau der organischen Schadstoffe.*
- *Die neu entwickelten Methoden der Algentoxine waren sowohl auf Wasserproben als auch auf Eluate von Sedimenten anwendbar. Hierdurch gelang es erste Befunde an Algentoxinen in ausgewählten Oberflächensedimenten (bis 5 cm Tiefe) eines Hafens im inneren Elbe-Ästuar und in der Ostsee zu erheben. Ein direkter Handlungsbedarf wird für die WSV noch nicht gesehen. Hierzu muss die Datenlage noch deutlich verbessert werden.*

²³ UV-Filter haben zum großen Teil endokrine, sprich: hormonelle Wirkungen.

den Gewässern beeinflussen. Niedrigwasser führt in den Binnenwasserstraßen unmittelbar zu erhöhten Konzentrationen an Schadstoffen, weil auch während Trockenperioden der Zufluss an gereinigtem Abwasser in die Flüsse weitgehend konstant ist. Da die organischen Schadstoffe in der Regel über die kommunalen Kläranlagen in die Gewässer eingetragen werden, würde die Einführung einer 4. Reinigungsstufe zur Entfernung der Spurenstoffe zu einer deutlichen Verbesserung der Gewässerqualität führen.

Ein Einfluss der Temperatur auf die Sorption und Desorption an Sedimenten konnte für die 87 untersuchten Insektizide, Herbizide, Biozide, Pharmaka, Flammschutzmittel und Weichmacher nicht nachgewiesen werden. Eine signifikante Verlagerung der an Sedimenten sorbierten Biozide in die Wasserphase ist auch bei einer klimabedingten Erhöhung der Wassertemperaturen von +2 bis +5 °C nicht zu erwarten.

Aus den temperaturabhängigen Abbaustudien konnten erste Transformationsprodukte identifiziert und in Oberflächengewässern nachgewiesen werden. Eine Evaluierung der Transformationsprodukte erfolgt noch am Projektende. Die Abbaugeschwindigkeit der Biozide nimmt mit der Wassertemperatur von 4 °C über 12 °C bis zu 20 °C zu. Dies gilt für alle untersuchten Stoffe, die mikrobiologisch abbaubar waren. Daher ist davon auszugehen, dass eine klimabedingte Erhöhung der Wassertemperatur (im Mittel +2 °C) vermutlich zu einem geringfügig erhöhten Abbau der organischen Schadstoffe führt. Erst bei extremen Wassertemperaturen (28 °C) wurde in den Wasser/Sediment-Systemen ein Rückgang des Abbaus der Schadstoffe beobachtet, da sich vermutlich die Zusammensetzung der Biozönosen deutlich veränderte.

4.8 ALGENTOXINE

Bei einer Erhöhung der maximalen Wassertemperatur und bei verringerter Fließgeschwindigkeit können verstärkt Blaualgen (Cyanobakterien) auftreten, welche unter ungünstigen Bedingungen hochaktive Giftstoffe (Algentoxine) produzieren können. Um das Auftreten von Blaualgentoxinen schon frühzeitig zu erkennen, wurden neue empfindlichere analytische Messmethoden entwickelt, mit denen die Algentoxine auch schon in sehr geringen Konzentrationen (wenigen Nanogramm/L) quantifiziert werden können.

Die neu entwickelten Methoden waren sowohl auf Wasserproben als auch auf Eluate von Sedimenten anwendbar. Hierdurch gelang es, erste Befunde an Algentoxinen in ausgewählten Oberflächensedimenten (bis 5 cm Tiefe) eines Hafens im inneren Elbe-Ästuar und in der Ostsee nachzuweisen. Weitergehende Interpretationen sind erst nach umfassenden weiteren Beprobungen, vor allem in den Sommer- und Herbstmonaten, möglich. Dieser Aspekt wäre zukünftig sowohl auf nationaler, als auch auf EU-Ebene in verschiedenen Bereichen der Gewässerkunde zu adressieren.

4.9 SAUERSTOFFGEHALTE UND ALGEN IN NORDSEEÄSTUAREN

Um die Zufahrten zu den deutschen Seehäfen zu ermöglichen, sind die Nordseeästuarre von Elbe, Weser und Ems für große Container- bzw. Kreuzfahrtschiffe vertieft worden und zusätzlich wiederkehrende Unterhaltungsmaßnahmen (Baggerungen) erforderlich. Diese, wie auch vielfältige andere Nutzungen der Ästuaren, sind im Einklang mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und anderen naturschutzrechtlichen Anforde-

rungen durchzuführen. Aus diesem Grund untersuchen wir, inwieweit die Nutzung durch die Schifffahrt und die damit zusammenhängenden Maßnahmen die Wasserqualität der Ästuare beeinträchtigen können. Insbesondere der Sauerstoffgehalt, der in der Elbe und in der Ems im Sommer starke Defizite aufweist, sowie das Vorkommen von Algen sind wichtige Kenngrößen zur Beurteilung des ökologischen Zustandes.

Für die Beurteilung der Frage, inwieweit die Unterhaltungskonzepte (z. B. Sedimentmanagement) zur Gewährleistung der jetzigen Nutzung der Bundeswasserstraßen als Schifffahrtsweg durch den Klimawandel betroffen sein werden, können mit Simulationen des Gewässergütemodells QSim der BfG notwendige Grundlagen erarbeitet werden. Bereits im heutigen Zustand der Tideelbe zeigt sich, dass ein geringer Oberwasserzufluss im Sommer die Algenentwicklung in der Mittel- und Unterelbe begünstigt und so vermehrt Algen und deren organische Abbauprodukte (= Detritus) in das Ästuar eingetragen werden. Durch den mikrobiellen Abbau dieses organischen Materials entstehen dann im Sommer kritische Sauerstoffgehalte in der Tideelbe.

Wir konnten mit Hilfe des sogenannten *Delta-Change-Ansatzes* zeigen, dass der Einfluss des Oberwasserabflusses auf die Sauerstoffgehalte und die gesamte Gewässergüte der Tideelbe bedeutsamer ist als die Erhöhung der Lufttemperaturen. Die Projektionen der fernen Zukunft mit den am stärksten verringerten (bis -25 Prozent) Oberwasserzuflüssen (Projekt 4.01, siehe Kapitel 5.2) zeigen dabei die negativsten Auswirkungen auf den Sauerstoffgehalt (siehe Abbildung 4). Demgegenüber haben stark steigende Lufttemperaturen (bis +4,5 °C, siehe Kapitel 5.1) und daran gekoppelt steigende Wassertemperaturen insbesondere im Sommer einen Rückgang der Algenbiomassen (durch das überschrittene Temperaturoptimum für die Algen) zur Folge und führen so zu einer tendenziellen Entlastung des sommerlichen Sauerstoffhaushalts. Dafür verschärft sich in diesen Projektionen die Sauerstoffproblematik im Frühjahr und Herbst.

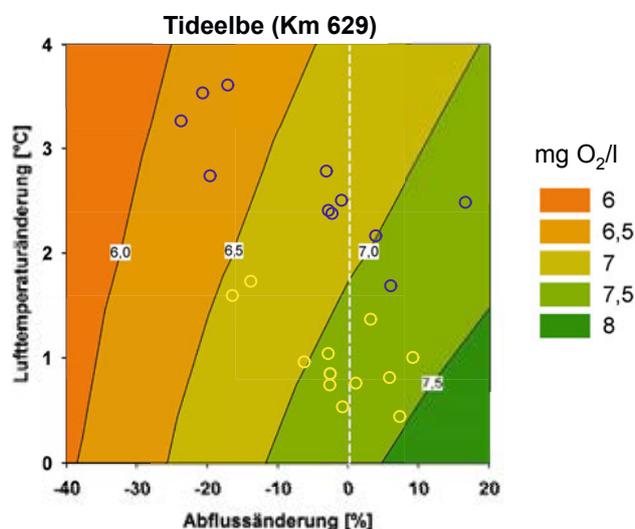


Abbildung 4: Antwortfläche für die Saisonmittelwerte (April bis Oktober) des Sauerstoffgehalts (1998 bis 2010) am Elbe-Kilometer 629 (Seemannshöft). Die gelben Kreise stellen die Projektionen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die blauen Kreise die Projektionen für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) dar.

Eine Abnahme der Sommerniederschläge an der Elbe, die mit geringeren Oberwasserabflüssen einhergehen würden, ist jedoch in der nahen und fernen Zukunft nicht für alle bisher betrachteten Abflussprojektionen erkennbar (siehe Kapitel 5.2). Aufgrund der ermittelten Bandbreite der Änderungen der sommerlichen Oberwasserabflüsse und der höheren Lufttemperaturen sehen wir aber für gut die Hälfte der Projektionen der nahen Zukunft und die Mehrzahl der Projektionen der fernen Zukunft einen Rückgang der Sauerstoffgehalte der Tideelbe (siehe Abbildung 4) und damit eine Zunahme kritischer Sauerstoffsituationen. Hierdurch könnte die Unterhaltung der Tideelbe, etwa bei Baggergutumlagerungen, betroffen sein.

Vermeidbar sind Folgen für den Sauerstoffgehalt der Tideelbe durch nachhaltige Sanierungsmaßnahmen²⁴, die einen Rückgang der Algenbiomassen im Einzugsgebiet bewirken.

²⁴ Weitere Details siehe Quiel et al., 2010.

Durch den dann gleichzeitig reduzierten Eintrag von organischem Kohlenstoff verbessern sich die Sauerstoffgehalte im Elbe-Ästuar. Ohne diese Maßnahmen wird das ökologische Potenzial der Tideelbe, das bereits heute durch die Gewässermorphologie, insbesondere durch die großen Wassertiefen im Bereich des Hamburger Hafens eingeschränkt ist, durch den Klimawandel weiter eingeschränkt werden.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Der Sauerstoffgehalt der Tideelbe wird durch den Oberwasserzufluss und die damit aus der Mittelelbe ins Ästuar eingetragenen Algen und deren organischen Abbauprodukte gesteuert.*
- *Klimaprojektionen mit abnehmenden Oberwasserzuflüssen, die weniger in der nahen, dafür aber vermehrt in der fernen Zukunft auftreten, bewirken zurückgehende Sauerstoffgehalte in der Tideelbe.*
- *Alle Klimaprojektionen weisen höhere Lufttemperaturen und damit einhergehend höhere Wassertemperaturen auf. Wassertemperaturen über 25 °C können das Algenwachstum deutlich mindern, sodass bei Projektionen der fernen Zukunft, insbesondere im Sommer, weniger Algenbiomasse und deren organische Abbauprodukte in die Tideelbe eingetragen werden und so der Sauerstoffhaushalt entlastet wird. Dafür nimmt in diesen Projektionen die Belastung aufgrund höherer Biomassen im Frühjahr und Herbst zu.*
- *Die durch veränderte Oberwasserzuflüsse hervorgerufenen Sauerstoffänderungen in der Tideelbe sind stärker als die durch Lufttemperaturänderungen bewirkten Effekte.*

4.10 MIKROBIOLOGISCH-HYGIENISCHE BETRACHTUNG DER KÜSTENGEWÄSSER

Krankheitserregende Mikroorganismen können unter Umständen die Gesundheit von Menschen gefährden, die am oder im Gewässer arbeiten, mit Fischereiprodukten in Berührung kommen oder Erholung am Gewässer suchen. Wir haben deshalb Sedimente und Wasserproben der Küstengewässer auf potenziell pathogene Vibrionen²⁵ untersucht und abgeschätzt, inwieweit sich das Vorkommen dieser Organismen klimabedingt ändern kann. Daraus leiten wir erste Risikoabschätzungen und Handlungsempfehlungen ab.

Durch unsere Monitoringprogramme konnten wir zeigen, dass potenziell pathogene Vibrionen in deutschen Küstengewässern weit verbreitet sind. Diese treten teilweise räumlich und zeitlich begrenzt auf. Wir konnten insbesondere die Brackwasserbereiche der Ostsee, aber auch der Nordseeästuar als mögliche Gefährdungsbereiche für Vibrioneninfektionen identifizieren. Hier sind bereits in der Vergangenheit durch niedrige Salzgehalte begünstigte Arten²⁶ nachgewiesen worden, die über Hautverletzungen bei Kontakt mit kontaminiertem Wasser oder Fischereierzeugnissen in den Körper gelangen und zu Wundinfektionen führen können. Diese treten selten und insbesondere bei immungeschwächten Menschen auf, sind aber häufig durch einen schweren Krankheitsverlauf gekennzeichnet. Die Mitarbeiter der WSV und deren Auftragnehmer sollten daher z. B. durch eine Informationsbroschüre auf mögliche Infektionsrisiken hingewiesen werden. Eine mögliche Vorkehrung ist, im Sommer bei Arbeiten am Gewässer Handschuhe zu tragen.

Wir konnten nachweisen, dass das Vorkommen von Vibrionen (insbesondere *V. vulnificus*) in den deutschen Küstengewässern durch Wassertemperaturen über 20 °C begünstigt wird. Steigende Wassertemperaturen und eine Häufung von Hitzetagen

²⁵ Vibrionen: natürlicherweise in Meeren und Küstengewässern vorkommende Bakterien der Gattung *Vibrio*, die 12 humanpathogene Arten aufweist.

²⁶ *V. vulnificus*, insbesondere an der Ostseeküste auch *V. cholerae* non-O1, non-O139.

könnten somit das Vorkommen potenziell pathogener Vibrionen begünstigen. Zusätzlich erwarten wir durch die Verschiebung der Brackwasserzonen (siehe Kapitel 4.4) eine räumliche Verlagerung der Habitats von *V. vulnificus*. Unsere Ergebnisse belegen auch, dass neben Wassertemperatur und Salzgehalt zusätzliche, bisher nicht identifizierte, Einflussgrößen eine große Rolle für das Vorkommen der verschiedenen *Vibrio*-Spezies spielen und die Quantifizierung klimatischer Einflüsse somit erschweren.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Das Vorkommen potenziell pathogener Vibrionen ist von der Wassertemperatur abhängig. Wassertemperaturen von mindestens 20 °C begünstigen insbesondere das Vorkommen von V. vulnificus, der in Deutschland bereits als Wunderreger in Erscheinung getreten ist.*
- *Vorkommen von V. vulnificus konzentrieren sich auf die Brackwasserbereiche der Ostsee und der Nordseeästuar. An der Ostsee hat zudem V. cholerae non-O1, non-O139 als potenzieller Wunderreger eine Bedeutung. Die Habitats dieser Brackwasser liebenden Arten könnten sich in Folge der Verschiebung der Brackwasserzonen verlagern.*
- *Sedimente stellen ein Reservoir für potenziell pathogene Vibrionen dar. Inwiefern die Remobilisierung von Sedimenten letztlich auch zu einer Verdriftung von Vibrionen führen kann, bedarf weitergehender Untersuchungen.*

In Sedimenten festgestellte *Vibrio*-Konzentrationen liegen um ein bis drei Größenordnungen höher als im Wasser. Anhand molekularbiologischer Analysen konnten wir pathogene *V. parahaemolyticus*-Vertreter in Sedimenten, nicht aber in Wasserproben identifizieren. Sedimente stellen somit ein deutliches, aber bislang wenig beachtetes Reservoir für potenziell pathogene Vibrionen dar. Ein Partikeltransportmodell des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie zeigte bereits, dass *V. vulnificus* aus dem Ems-Ästuar an Küstenbadestrände verdriftet werden kann. Inwiefern dabei eine Remobilisierung aus Sedimenten eine Rolle spielt, soll in weitergehenden Untersuchungen geklärt werden.

4.11 VORLANDVEGETATION IN NORDSEEÄSTUAREN

HINTERGRUND

Die Vegetation im Deichvorland der Ästuar erfüllt sowohl für den Menschen als auch für den Naturhaushalt zahlreiche Funktionen. Z. B. bildet sie einen natürlichen Erosionsschutz der Ufer, sie trägt zur Selbstreinigung der Flüsse bei, liefert Reet, bietet Lebensraum für geschützte Tier- und Pflanzenarten und enthält zahlreiche geschützte Biototypen.

Struktur und Artenzusammensetzung der Ästuarvegetation wurden durch Landwirtschaft, Wasserbau und Wasserwirtschaft verändert. Wir untersuchen, inwieweit deren Eigenschaften und Funktionen zusätzlich klimabedingt beeinflusst werden können. Hierfür haben wir Vegetationsmodelle entwickelt, störungsökologische Untersuchungen durchgeführt und die Landnutzung analysiert. Darauf aufbauend leiten wir Anpassungsoptionen für die Unterhaltung der Ästuar und ihrer Vorländer ab, um künftig sowohl die Wasserstraße als umweltfreundlichen Verkehrsträger wie auch die Vegetation der Ufer und Vorländer nachhaltig zu sichern.

BISHERIGE ERGEBNISSE

Schilf ist bei geringer hydraulischer Belastung die dominierende Röhrichtart und gedeiht im Experiment selbst noch in einer Tiefe von 2 m unter mittlerem Tidehochwasser (MThw)²⁷.

²⁷ Für Details siehe Schoenberg et al., 2012.

Unter stärkerer hydraulischer Belastung, z. B. an Prallhängen der Elbe, bildet sich dagegen eine Zonierung der Röhrichtarten heraus, wobei die unterste Zone (-2 m bis -0,5 m zu MThw) von Pionierröhrichten dominiert wird. Winterliche Schilfmahd steigert die Halmdichte in der folgenden Vegetationsperiode sowie die Vorkommens- und Blühhäufigkeit der gefährdeten Art Sumpfdotterblume.

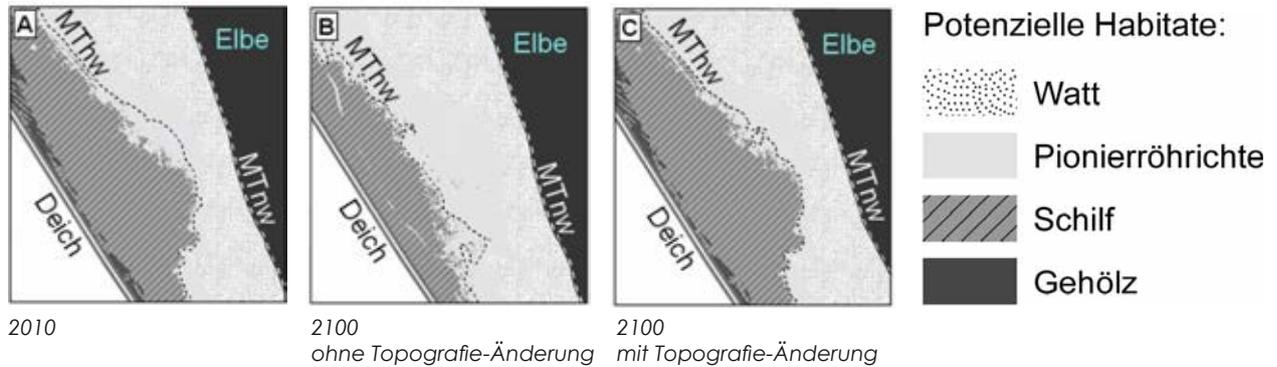


Abbildung 5: Habitatänderung an der Elbe (Wischhafen), basierend auf zwei Szenarien. A: Referenzdaten 2010, B und C: Modellerte Vegetationsverteilung 2100 ohne / mit Topografieänderung²⁸

Die Habitatmodellierung für die Ästuarvegetation an der Elbe ergibt, dass ein Anstieg des MThws um ca. +20 cm bis 2100 bei gleichbleibender Topografie (ohne Sedimentation) zu einem Schilfrückgang führen würde (siehe Abbildung 5); mit Sedimentation (im Ausmaß des Anstiegs des MThws) würde sich nichts ändern. Folglich ist die Abschätzung der potenziellen Topografieänderung für regionale Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel unabdingbar.

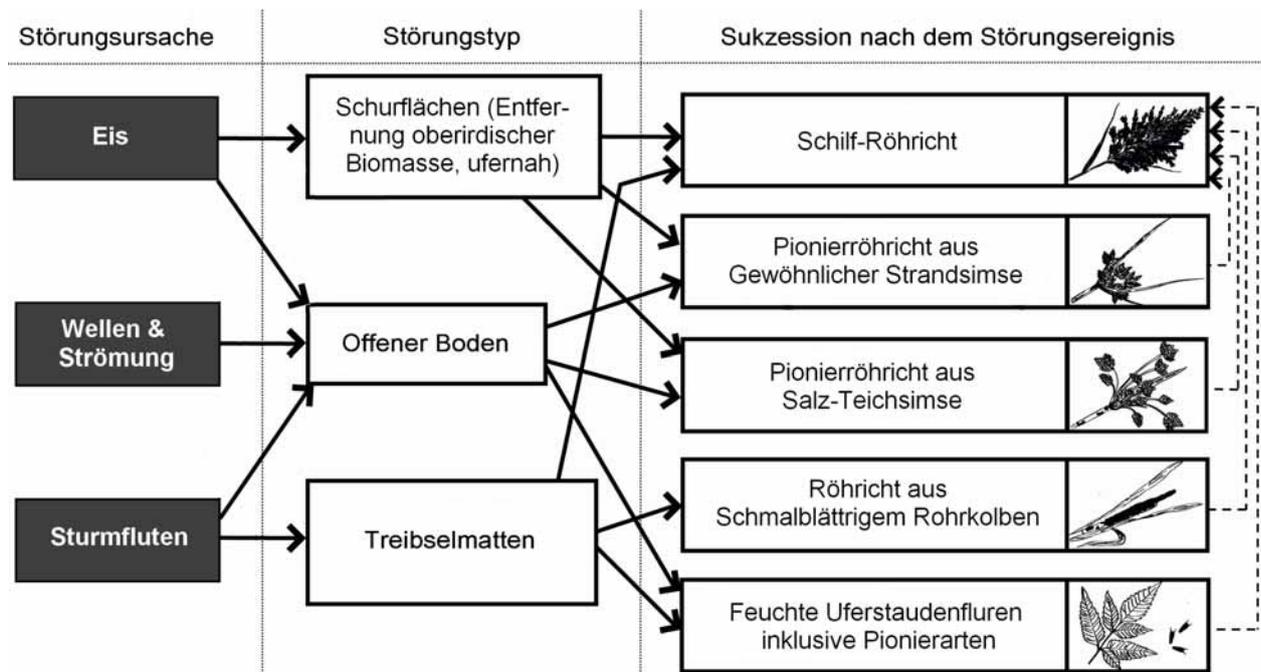


Abbildung 6: Typische klimaabhängige Störungs- und Sukzessions-Pfade im Röhricht. Schilf dominiert ungestörte Flächen. Durchbrochene Pfeile zeigen die Sukzession, wenn die Störung nicht erneut auftritt.

28 Abbildung aus Fuchs et. al., 2013.

In Abbildung 6 ist dargestellt, wie sich klimaabhängige Störungen auswirken und welche Sukzession darauf folgt. Das Potenzial gestörter Röhrichtbereiche, sich durch das Wiederaufkommen von Schilf selbst zu „reparieren“, begünstigt den natürlichen Erosionsschutz.

Für die Zukunft ist eine Verstärkung von Störungsfaktoren und dadurch eine zunehmende Vegetationsdynamik möglich. Zwar ist aufgrund klimabedingt erhöhter Wassertemperaturen mit weniger Eistagen zu rechnen, jedoch sind lokal zunehmende (Wind-) Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten möglich (siehe Kapitel 4.1 und 4.2). Dies dürfte zu einer Reduzierung von Schilfflächen und zu einer Zunahme von Pioniervegetation führen. Eng begrenzt ist eine gesteigerte Artenvielfalt zu erwarten; lokal ist die Ausbreitung der Neophyten Drüsiges Springkraut bis zu MThw -1,4 m (mit verringerter Vitalität) und Japan-Knöterich bis zu MThw -2,1 m²⁹ möglich. Eine gleichzeitige Reduktion von Schilfflächen bedeutet ein erhöhtes Erosionspotenzial.

Um die zukünftige Entwicklung der Vorlandvegetation sowie die Änderungen im Störungsregime verfolgen zu können, ist ein Monitoring unabdingbar. Es erlaubt, Bereiche mit notwendigen Anpassungsmaßnahmen zu detektieren. Die Klassifizierung von Biotoptypen auf der Basis von RapidEye-Satellitendaten mit einer Auflösung von 6,5 m zeigt, dass solche Daten für ein Langzeitmonitoring der Haupteinheiten der Biotope in den Ästuaren geeignet sind (Maßstab ca. 1:10.000 – 1:25.000)³⁰. Gegenüber flugzeuggestützt erhobenen Daten ergäbe sich eine deutliche Kosten- und Zeitersparnis. Für die Erfassung von Störungsmustern und Artvorkommen haben sich Hyperspektralsensoren bewährt³¹.

29 Für Details siehe Röder, 2010.

30 Für Details siehe Bahls & Kleinschmit, 2012.

31 Für Details siehe Faude & Schmidlein, 2012.



5. DIE ELBE

Die Elbe als Wasserstraße

Die ca. 600 km lange deutsche Binnenelbe ist trotz ihres vielfach naturnahen Erscheinungsbildes eine durchgängig ausgebaute Bundeswasserstraße. Bei normalen Abflussverhältnissen von der Grenze zu Tschechien bis vor die Tore Hamburgs wird die Elbe durch Stromregelungsbauwerke, überwiegend durch Buhnen, in ihrem Bett gehalten, wobei der frei fließende Charakter des Stromes weitgehend erhalten geblieben ist.

Die Elbe und die mit ihr verbundenen schiffbaren Fließgewässer verbinden als Wasserstraßensystem zwischen der deutsch-tschechischen Grenze und Hamburg die Wirtschaftszentren Tschechiens, Sachsens, Sachsen-Anhalts, Niedersachsens, Brandenburgs und Berlins mit dem Hafen Hamburg und mit dem westdeutschen Binnenwasserstraßennetz. Die Elbe ist eine internationale Wasserstraße und wurde in der kürzlich überarbeiteten TEN-Richtlinie durch die EU als Wasserstraße mit europäischer Bedeutung ausgewiesen.

Für den Transport auf der Elbe kommt häufig speziell an den Fluss angepasste Schiffstechnik zum Einsatz. Mit den flachgehenden Fahrzeugen kann weitestgehend unabhängig von den für einen frei fließenden Fluss natürlichen Wasserstandschwankungen ein wirtschaftlicher und umweltfreundlicher Güter- und Warentransport gewährleistet werden. Das Grundkonzept basiert hierbei auf dem Einsatz von Schubverbänden. So werden in der letzten Zeit verstärkt Schwerlasten und Projektladungen auf der Elbe transportiert. Diese Art des Transports hat viele Vorteile. So gibt es durch das große Lichtraumprofil der Elbe kaum Einschränkungen auf Grund der Abmessungen der Güter. Durch das geringe Ladungsgewicht, von z. B. Teilen von Windkraftanlagen, sind die Transporte auch bei niedrigen Wasserständen realisierbar.

Durch das große Lichtraumprofil, hier besonders bei den Brückendurchfahrtshöhen, ist gegenüber den Kanalstrecken ein dreilagiger Containerverkehr auf der Elbe möglich. So können im langjährigen Mittel an 343 Tagen im Jahr zwischen Hamburg und dem Hafen Magdeburg sowie an 321 Tagen im Jahr zwischen dem Hafen Magdeburg und Dresden Container in drei Lagen transportiert werden. So betreibt beispielsweise die ETS Elbe dreimal wöchentlich einen Containerlinienverkehr ab Riesa über Aken und Magdeburg.

Durch gezielte Speicherbewirtschaftung der tschechischen Talsperren als Wellenabgabe werden Schiffskörper für seegängige Binnen- und Tankschiffe von tschechischen Werften zur Nordsee überführt.

An der Elbe fanden bereits vor Projektstart des Forschungsprogramms KLIWAS Forschungen hinsichtlich des künftigen Abflusses statt. Ein Beispiel ist das Projekt GLOWA-Elbe. Dies beruht auf dem damals üblichen Verfahren der Modellierung: innerhalb der Modellkette wurde jeweils nur ein Modell ausgewählt. Die Ergebnisse bilden folglich einen kleinen Teil der Ergebnisbandbreite des Ensembles-Ansatzes ab. Dieses Vorgehen erfordert geringere Ressourcen als der Ensembles-Ansatz; es ist jedoch nicht möglich abzuschätzen, ob sich die errechneten Projektionen im eher unteren, mittleren oder oberen Bereich (z. B. Zunahme oder Abnahme der Abflüsse) der Ergebnisbandbreite bewegen. Aus diesem Grund haben wir im Forschungsprogramm KLIWAS den Ensembles-Ansatz, also die Nutzung möglichst vieler Modelle pro Modellerschritt, gewählt (siehe Kapitel 3.1).



5.1 KLIMA IM ELBE-EINZUGSGEBIET

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- Für die Lufttemperaturen wird in beiden untersuchten Zeiträumen (2021 bis 2050 bzw. 2071 bis 2100) ein Anstieg erwartet.
- Dabei werden die Lufttemperaturen im Winter etwas stärker zunehmen als im Sommer.
- Für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) sind keine klaren Trends der Niederschlagsänderung erkennbar.
- In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) können die Niederschläge im Sommer abnehmen und im Winter zunehmen.

Im Folgenden werden die für KLIWAS relevanten meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag für den Winter (Dezember bis Februar) und den Sommer (Juni bis August) betrachtet. Hierzu sind jeweils die modellierten prozentualen Abweichungen der nahen Zukunft (2021 bis 2050) und der fernen Zukunft (2071 bis 2100) bezogen auf den Referenzzeitraum (1961 bis 1990) dargestellt.

Für das Einzugsgebiet der Elbe ergeben unsere nachbearbeiteten Klimaprojektionen³² im Mittel einen sommerlichen Temperaturanstieg von +1 bis +2 °C für die nahe Zukunft (2021 bis 2050), bzw. +3 bis +5 °C für die ferne Zukunft (2071 bis 2100). Für den Winter ergeben sich ähnliche Werte (siehe Tabelle 5).

Bei den Niederschlägen weicht die Sommer- von der Wintersaison deutlicher ab. Für die nahe Zukunft werden mittlere Niederschlagsänderungen von -5 bis +10 Prozent für den Sommer bzw. -5 bis +15 Prozent im Winter erwartet. Für die ferne Zukunft variieren unsere Ergebnisse von -25 bis -5 Prozent im Sommer bzw. +5 bis +25 Prozent im Winter. Das heißt, dass für die ferne Zukunft eindeutige Tendenzen in Richtung Niederschlagszunahme im Sommer und Niederschlagsabnahme im Winter zu erkennen sind.

³² Die Daten der Globalen Klimamodelle wurden auf einen geeigneten Maßstab (5 x 5 km²) heruntergerechnet und mit sogenannten Bias-Verfahren (siehe Glossar) korrigiert.

Tabelle 5: Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Elbe-Einzugsgebiet
Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990

| ELBE | | 2021 BIS 2050 | 2071 BIS 2100 |
|-----------------------|-----------|------------------|------------------|
| Lufttemperatur Sommer | Elbe | +1,0 bis +2,0 °C | +2,5 bis +4,0 °C |
| | Vltava | +1,0 bis +2,0 °C | +3,0 bis +5,0 °C |
| | Eger | +1,0 bis +2,0 °C | +2,5 bis +4,5 °C |
| | Labe | +1,0 bis +2,0 °C | +2,5 bis +5,0 °C |
| | Mitttelbe | +1,0 bis +2,0 °C | +2,5 bis +4,5 °C |
| | Saale | +1,0 bis +2,0 °C | +2,5 bis +4,5 °C |
| | Havel | +1,0 bis +2,0 °C | +2,0 bis +4,5 °C |
| | Untereibe | +1,0 bis +2,0 °C | +2,0 bis +4,0 °C |
| | Tideelbe | +1,0 bis +2,0 °C | +2,0 bis +4,0 °C |
| Lufttemperatur Winter | Elbe | +0,5 bis +2,5 °C | +2,5 bis +5,0 °C |
| | Vltava | +0,5 bis +2,5 °C | +2,0 bis +5,0 °C |
| | Eger | +0,5 bis +2,5 °C | +2,0 bis +5,0 °C |
| | Labe | +0,5 bis +2,5 °C | +2,0 bis +5,5 °C |
| | Mitttelbe | +0,5 bis +3,0 °C | +2,5 bis +5,5 °C |
| | Saale | +0,5 bis +3,0 °C | +2,5 bis +5,0 °C |
| | Havel | +0,5 bis +2,5 °C | +2,5 bis +5,0 °C |
| | Untereibe | +0,5 bis +2,5 °C | +2,5 bis +5,0 °C |
| | Tideelbe | +0,5 bis +2,5 °C | +2,5 bis +5,0 °C |
| Niederschlag Sommer | Elbe | -7 bis +9% | -24 bis -4% |
| | Vltava | -8 bis +12% | -22 bis -1% |
| | Eger | -5 bis +12% | -27 bis -2% |
| | Labe | -9 bis +14% | -22 bis -0% |
| | Mitttelbe | -6 bis +11% | -27 bis -1% |
| | Saale | -7 bis +13% | -27 bis -4% |
| | Havel | -6 bis +5% | -24 bis -4% |
| | Untereibe | -11 bis +6% | -24 bis 0% |
| | Tideelbe | -12 bis +7% | -26 bis -5% |
| Niederschlag Winter | Elbe | -6 bis +16% | +3 bis +23% |
| | Vltava | -8 bis +17% | +4 bis +27% |
| | Eger | -3 bis +15% | +6 bis +28% |
| | Labe | -3 bis +18% | +5 bis +29% |
| | Mitttelbe | -8 bis +16% | 0 bis +21% |
| | Saale | -5 bis +14% | +4 bis +21% |
| | Havel | -3 bis +17% | +2 bis +22% |
| | Untereibe | -2 bis +17% | +6 bis +22% |
| | Tideelbe | 0 bis +17% | +10 bis +26% |

Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft.
Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Projektionen.

5.2 HYDROLOGIE IM ELBE-EINZUGSGEBIET

Die Klimamodellierungen gehen entlang der Modellkette in unterschiedliche Rechenschritte direkt oder indirekt ein. Sie sind beispielsweise ein Baustein der Abflussmodellierungen in den Flussgebieten. Die Ergebnisse der Abflussmodellierungen werden in prozentualen Abweichungen zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990 angegeben.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- Die mittleren Abflüsse (MQ) variieren im Vergleich zum Referenzzeitraum für die nahe Zukunft im hydrologischen Sommer zwischen -20 Prozent und +10 Prozent. Im hydrologischen Winter ergeben sich Änderungen von -15 Prozent bis + 10 Prozent.
- Die mittleren Abflüsse (MQ) können in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) im Sommer im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 abnehmen. Für den Winter ergibt sich kein klarer Trend.
- Die Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) zeigen für die nahe Zukunft keine eindeutigen Änderungen, in der fernen Zukunft können sie abnehmen.

Für Niedrigwasserabflüsse (NM7Q bezogen auf ein Wasserhaushaltsjahr) ergibt sich für das Elbe-Einzugsgebiet für die nahe Zukunft ein indifferentes Bild mit einer Ergebnisbandbreite von -15 bis +10 Prozent (siehe Tabelle 6). Für die ferne Zukunft ergeben sich Änderungen zwischen 0 und -25 Prozent bzw. -30 Prozent. Ordnen wir die Ergebnisse des Forschungsprojekts GLOWA-Elbe in unsere Ergebnis-Bandbreite ein, so liegen diese Abflüsse deutlich am trockenen Rand der KLIWAS-Bandbreite.

Die Änderungen im Niedrigwasser treten überwiegend im hydrologischen Sommer³³ auf. Für Niedrigwasserabflüsse im hydrologi-

schen Winter³⁴ konnte anhand des KLIWAS-Ensembles kein klarer Trend zu höheren oder niedrigeren Abflüssen ermittelt werden.

Die mittleren Abflüsse (MQ) variieren im Vergleich zum Referenzzeitraum für die nahe Zukunft im hydrologischen Sommer zwischen -20 und +10 Prozent sowie für die ferne Zukunft zwischen -30 und +5 Prozent. Im hydrologischen Winter ergeben sich Änderungen von -15 bis +10 Prozent (nahe Zukunft) bzw. -30 bis +10 Prozent (ferne Zukunft). Die Projektionen, die im Hinblick auf Hochwasserkennwerte (HMQ5) ausgewählt wurden, bewegen sich zwischen -5 und +20 Prozent für die nahe Zukunft sowie -40 und +20 Prozent für die ferne Zukunft.

³³ Hydrologischer Sommer: Mai bis Oktober.

³⁴ Hydrologischer Winter: November bis April.

Tabelle 6: Mittel- und Niedrigwasserkennwerte (MQ und NM7Q) im Elbe-Einzugsgebiet

| PARAMETER | PEGEL | SZENARIENKORRIDOR | |
|--|------------------|-------------------|-----------------|
| | | ÄNDERUNG [%] | ÄNDERUNG [%] |
| | | NAHE ZUKUNFT | FERNE ZUKUNFT |
| MQ [m ³ /s] Hydrologischer Winter (Nov–Apr) | Decin | -10 % bis 0 % | -20 % bis +10 % |
| | Barby | -10 % bis 0 % | -20 % bis +10 % |
| | Neu Darchau | -15 % bis 0 % | -20 % bis +10 % |
| | Rathenow (Havel) | -15 % bis +5 % | -25 % bis +10 % |
| | Calbe (Saale) | -10 % bis +10 % | -30 % bis +5 % |
| MQ [m ³ /s] Hydrologischer Sommer (Mai–Okt) | Decin | -20 % bis +5 % | -30 % bis -5 % |
| | Barby | -15 % bis +5 % | -25 % bis 0 % |
| | Neu Darchau | -15 % bis +5 % | -25 % bis 0 % |
| | Rathenow (Havel) | -20 % bis +10 % | -30 % bis +5 % |
| | Calbe (Saale) | -15 % bis +5 % | -30 % bis +5 % |
| NM7Q [m ³ /s] Wasserhaushaltsjahr (Apr–Mar) | Decin | -10 % bis +10 % | -30 % bis 0 % |
| | Barby | -10 % bis +10 % | -30 % bis 0 % |
| | Neu Darchau | -10 % bis +5 % | -25 % bis 0 % |
| | Rathenow (Havel) | -15 % bis +10 % | -25 % bis 0 % |
| | Calbe (Saale) | -15 % bis +10 % | -25 % bis -5 % |

Die Ergebnisse basieren auf einem Ensemble von 18 (2021 bis 2050) bzw. 16 (2071 bis 2100) Projektionen. Die Bandbreiten repräsentieren Cluster innerhalb des Ensembles in dem eine Mehrheit der Simulationen (70 bis 80 Prozent) besonders eng beieinander liegen. Eine orangefarbene Hinterlegung verweist auf eine Abflussabnahme; eine graue Hinterlegung zeigt ein uneinheitliches Änderungssignal der Projektionen an.

5.3 SEDIMENTHAUSHALT UND FLUSSBETTENTWICKLUNG

Für die weiteren Untersuchungen zum Sedimenthaushalt und zur Flussbettentwicklung wurden Projektionen mit mittlerem MQ sowie mit extremem und mittlerem HM5Q ausgewählt. Derzeit (zum Redaktionsschluss) laufen die Arbeiten der Feststofftransportmodellierung für das Elbe-Einzugsgebiet mit dem kalibrierten SOBEK-River-Modell (BCE 2009).

Die für eine Skalenintegration³⁵ (Upscaling) vorgesehenen mehrdimensionalen SSIM-3D-Modelle befinden sich ausnahmslos innerhalb der „Erosionsstrecke“ der Elbe (km 120 bis 290). Wir verfolgen mit diesem Verfahren das Ziel, die klimainduzierten Einflüsse auf der morphologischen Prozessebene zu erfassen sowie kleinskalige Anpassungsoptionen für ein zukünftiges Sedimentmanagement zu erarbeiten. Dabei ist insbesondere das Gebiet zwischen Mühlberg und der Saalemündung interessant, das durch eine fortschreitende Sohlerosion von ca. 1 bis 2 cm pro Jahr gekennzeichnet ist und sich insgesamt als morphologisch defizitäres System ausweist (WSV 2009). Seine klimatische Relevanz sowie seine ökologische Bedeutsamkeit erhält dieser Abschnitt der Elbe durch seine entlang des Flusslaufs gelegenen Auenwälder, die durch einen erosionsbedingten Wasserspiegelverfall in Kombination mit einer ungünstigen veränderten Abflusscharakteristik zunehmend gefährdet sind.

35 Siehe Glossar.

Mit unseren derzeit laufenden SSIM-3D-Modellierungen wollen wir Teilgebiete dieses Systems abbilden und mit unterschiedlichen räumlichen Diskretisierungen entlang der Elbe realisieren. Die Kalibrierung hierfür erfolgte anhand von Wasserspiegellagen, wobei die erzielten Ergebnisse mit der in der BfG entwickelten flusshydrologischen Software FLYS verifiziert wurden. Weiterhin haben wir ADCP-Messungen (Acoustic Doppler Current Profiler) verwendet. Die zu errechnenden Ergebnisse des Feststofftransports werden zum Redaktionsschluss nicht vorliegen, sondern zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht werden.

Historische Reihen zur Schwebstoffkonzentration und Schwebstofffracht an ausgewählten WSV-Schwebstoffmessstellen entlang der Elbe zeigen einen deutlichen Einfluss der Algenpopulation auf die ermittelte sommerliche Schwebstoffkonzentration. Ferner ist eine deutliche Hysterese beim Durchgang von Hochwasserwellen feststellbar, d. h. die Schwebstoffkonzentration ist bei steigendem Abfluss eine andere als bei sinkendem Abfluss. Darüber hinaus wird ein rückläufiger Trend bei Hitzacker (Einzugsgebietsauslass) von 1965 bis 2009 sowie ein Bruchpunkt um das Jahr 1990 beobachtet: Nach 1990 ist die Schwebstoffjahresfracht im Mittel etwa 30 Prozent geringer als vor diesem Jahr. Dieses Phänomen führen wir zum einen auf die Einstellung von industriellen und kommunalen Abwassereinleitungen zurück. Zum anderen bewirkten veränderte Landnutzung bzw. Bewirtschaftungstechniken in den Agrargebieten eine verringerte Bodenerosion und somit geringere Sedimenteinträge in das Elbeflussnetz.

Bei Extremereignissen werden außerdem etwa im Bereich Elbe-km 280 bis 390 Netto-Rückgänge in der Schwebstofffracht im Längsverlauf der Elbe beobachtet, die auf einen ausgeprägten Sedimentrückhalt auf den Überflutungsflächen im Vorland hinweisen.

Für die 1D-Modellierung des Schwebstofftransportes mit dem Modell SOBEK wurden aus den historischen Messreihen lineare Abfluss-Transport-Beziehungen für die Zuflüsse erstellt. Wir haben neun Abflussprojektionen in Subtagesschritten gerechnet und die simulierten täglichen Schwebstofffrachten an ausgewählten Stellen des Elbomodells zu langjährigen Mittelwerten für die nahe Zukunft und ferne Zukunft aggregiert. Unsere Modellergebnisse zeigen, dass die Schwebstofffrachten dem Trend der Entwicklung der mittleren Abflüsse (MQ) folgen. Dabei sind die Änderungen der Schwebstofffrachten nach unten oder oben stärker ausgeprägt als die Änderung des mittleren Abflusses.

Parallel dazu wurde mit dem Bodenerosionsmodell PESERA der Bodenabtrag durch fließendes Wasser im Einzugsgebiet der Elbe rasterbasiert berechnet und anschließend mit der Methode der flächenverteilten Sediment-Delivery-Ratio in die Größe Sedimenteintrag umgerechnet. Der Modellantrieb basiert auf Klimastatistiken für die nahe und die ferne Zukunft sowie auf dem Beobachtungszeitraum³⁶ aus fünf Klimaprojektionen. Andere Gebietsparameter wie Relief, Bodeneigenschaften, Landnutzung und Bodenbedeckung wurden in den Sensitivitätsstudien konstant gehalten. Für die jeweiligen WSV-Schwebstoffmessstellen werden wir für die Kalibrierung bzw. Validierung des Modells die beobachtete spezifische Schwebstofffracht mit dem berechneten Sedimenteintrag vergleichen. Wie in den Klimaänderungsstudien üblich, wurden die Ergebnisse als relative Änderungen zum Kontrolllauf angegeben.

Die Modellergebnisse von SOBEK und PESERA weisen für jede gemeinsam ausgewertete Klimaprojektion eine sehr gute Übereinstimmung hinsichtlich der Qualität (Zu- oder Abnahme) und der Quantität der Aussagen auf.

Wird das Ensemble jedoch auf die insgesamt ausgewerteten Member erweitert, so liegen die projizierten Änderungen zwischen -15 und +20 Prozent für die nahe Zukunft und zwischen -35 und +60 Prozent für die ferne Zukunft. Die Ergebnisbandbreite hängt folglich wesentlich von der Bandbreite der ausgewählten Klimaprojektionen ab.

³⁶ Beobachtungszeitraum 1951 bis 2006, vergleiche Glossar.



6. DIE DONAU

Die Donau ist mit knapp 3000 km der zweitlängste europäische Strom; sie durchfließt 10 Länder. In Deutschland ist die Donau auf 200 km Länge schiffbar; das jährliche Transportvolumen liegt in Deutschland bei ca. 10 Mio. t. Die Donau fließt von West nach Ost. Über Rhein, Main und die Donau ist der Frachtverkehr zwischen Amsterdam und dem Schwarzen Meer möglich. Damit verbindet die Donau Mitteleuropa mit Südeuropa.

6.1 KLIMA IM DONAU-EINZUGSGEBIET

Im Forschungsprogramm KLIWAS fanden an der Donau Untersuchungen zum regionalen Klimawandel und zur daraus resultierenden veränderten quantitativen Hydrologie statt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich die klimatischen Parameter in ähnlicher Weise ändern werden wie an der Elbe (siehe Tabelle 7), mit einer Tendenz zu höheren Temperaturen an der Donau.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- Sowohl die Sommer- als auch die Wintertemperaturen werden laut unseren Klimamodell-ergebnissen in beiden projizierten Zeiträumen (2021 bis 2050 bzw. 2071 bis 2100) steigen.
- Für die Niederschläge sind in der nahen Zukunft weder im Winter noch im Sommer eindeutige Trends erkennbar.
- In der fernen Zukunft können die Niederschläge im Sommer abnehmen. Für den Winter sind keine eindeutigen Trends erkennbar.

Tabelle 7: Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Donau-Einzugsgebiet
Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990

| DONAU | | 2021 BIS 2050 | 2071 BIS 2100 |
|-----------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| Lufttemperatur Sommer | Donau | +1 °C bis +2 °C | +3 °C bis +5 °C |
| | Obere Donau | +1 °C bis +2 °C | +3,5 °C bis +5 °C |
| | Inn | +1,5 °C bis +2,5 °C | +3,5 °C bis +5,5 °C |
| Lufttemperatur Winter | Donau | +0,5 °C bis +2,5 °C | +2 °C bis +5 °C |
| | Obere Donau | +1 °C bis +2,5 °C | +2,5 °C bis +5 °C |
| | Inn | +1 °C bis +2,5 °C | +2,5 °C bis +5 °C |
| Niederschlag Sommer | Donau | -10 % bis +5 % | -25 % bis -5 % |
| | Obere Donau | -10 % bis +5 % | -25 % bis -5 % |
| | Inn | -5 % bis +5 % | -25 % bis -10 % |
| Niederschlag Winter | Donau | -10 % bis +10 % | -5 % bis +25 % |
| | Obere Donau | -15 % bis +10 % | -5 % bis +25 % |
| | Inn | -10 % bis +10 % | -5 % bis +20 % |

Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, blaue Hinterlegung auf feuchtere Verhältnisse in der Zukunft – „blau“ findet sich an Elbe und Rhein, nicht jedoch an der Donau. Graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Projektionen.

6.2 HYDROLOGIE IM DONAU-EINZUGSGEBIET

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- Für die mittleren Abflüsse (MQ) im hydrologischen Winter (November bis April) sind weder für die nahe Zukunft (2021 bis 2050), noch für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) eindeutige Änderungen der Abflüsse erkennbar.
- Für den hydrologischen Sommer (April bis Oktober) ist für beide projizierten Zeiträume eine Abflussabnahme möglich.
- Für die Niedrigwasserabflüsse zeigen unsere Projektionen je nach Pegel einen Trend zur Abflussabnahme oder indifferente Signale.

Im nächsten Modellerschritt haben wir ein Ensemble von Abflussprojektionen erstellt. Bisher haben wir mit einem hydrologischen Modell auf Monatsbasis gerechnet. In diese Simulationen sind Daten aus 23 Klimaprojektionen eingegangen.

Das Abflussregime der Donau und ihrer Nebenflüsse ist durch eine intensive Speicher- und Talsperrenbewirtschaftung insbesondere in den alpinen Flussgebietsanteilen beeinflusst. Den hier getroffenen Aussagen werden die derzeitigen

Speicherbewirtschaftungsregeln zu Grunde gelegt. Verdunstung und weitere Bodenparameter werden wir in weiteren Arbeitsschritten einbeziehen. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse für Mittel- und Niedrigwasserkennwerte an ausgewählten Pegeln im oberen Donau-Einzugsgebiet dargestellt. Die dargestellten Ergebnisbandbreiten umfassen jenen Cluster innerhalb unseres Ensembles, in dem 70 bis 80 Prozent der Ergebnisse besonders eng zusammenliegen.

Tabelle 8: Mittel- und Niedrigwasserkennwerte (MQ und FDC-Q90) für die Donau

| KENNWERT | PEGEL | ÄNDERUNGEN | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | NAHE ZUKUNFT | FERNE ZUKUNFT |
| MQ [m3/s] Hydrologischer Winter (Nov – Apr) | Hofkirchen | -10 % bis +10 % | -25 % bis +15 % |
| | Achleiten | -5 % bis +10 % | -20 % bis +15 % |
| | Schärding (Inn) | -5 % bis +10 % | -5 % bis +15 % |
| MQ [m3/s] Hydrologischer Sommer (Mai – Okt) | Hofkirchen | -20 % bis 0 % | -40 % bis 0 % |
| | Achleiten | -20 % bis 0 % | -35 % bis -10 % |
| | Schärding (Inn) | -15 % bis 0 % | -35 % bis -10 % |
| 90 %-Quantil der Abflussdauercurve (Monatswerte) | Hofkirchen | -20 % bis 0 % | -40 % bis 0 % |
| | Achleiten | -15 % bis +5 % | -35 % bis 0 % |
| | Schärding (Inn) | -5 % bis +10 % | -25 % bis +5 % |

Orangefarbene Hinterlegung weist auf trockenere, graue Hinterlegung zeigt indifferente Signale der unterschiedlichen Projektionen. Der Trend zu feuchteren Verhältnissen ist – wie auch bei den Niederschlagsprojektionen (Tabelle 7) – an der Donau nicht zu erkennen.

Unsere Ergebnisse der Mittelwasserabflüsse zeigen im hydrologischen Winter (November bis April des Folgejahres) keine klaren Änderungen; dies gilt sowohl für die nahe, als auch für die ferne Zukunft.

Für den hydrologischen Sommer (Mai bis September eines Jahres) zeigt die Mehrzahl unserer Projektionsergebnisse Abflussabnahmen. Diese sind in der fernen Zukunft ausgeprägter als in der nahen Zukunft.

Für die Niedrigwasserabflüsse (niedrigste Monatsabflüsse, FDC-Q90) zeigen unsere Projektionen je nach Pegel eine Tendenz zur Abflussabnahme oder indifferente Signale.

Ob oder in wie weit diese Abflussverhältnisse in der fernen Zukunft zu veränderten Abladetiefen führen können, wird noch zu untersuchen sein. Dazu sind Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten aus einem Tageswertmodell für die Abflüsse abzuleiten.

Gewässerchemische und -ökologische Untersuchungen sind für alle Flussgebiete im Kapitel 8 dargestellt.



7. DER RHEIN

Die Wasserstraße Rhein

Der Rhein ist die verkehrsreichste europäische Binnenwasserstraße. Ein Großteil der deutschen Im- und Exporte wird über die Rheinmündungshäfen abgewickelt. Für die transportaffinen Industriebetriebe und -zentren an Rhein, Ruhr, westdeutschen Kanalgebiet, Mosel und Saar, Main und Neckar bedeutet der Rhein die Verbindung mit den ARA-Häfen; er ist damit das Rückgrat des deutschen Binnenwasserstraßennetzes. Er hat mit seinem Netz von Kanälen und Nebenflüssen immer noch Auslastungsreserven. Ca. 170 Mio. Gütertonnen passieren jährlich die deutsch-niederländische Grenze am Niederrhein, rund 60 Mio. den Mittelrhein und rund 25 Mio. den Oberrhein. 2 Mio. TEU Container, das sind 90 Prozent der mit Binnenschiffen durchgeführten Containertransporte, werden in Deutschland über den Rhein abgewickelt. Prognosen gehen von einem weiter steigenden Transportaufkommen aus.

Für die Standortwahl von Betrieben und für die Nutzung des Wasserweges sind Funktionsfähigkeit, langfristig kalkulierbare Transportrahmenbedingungen und Zuverlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Als hochwirtschaftlicher Transportweg sind die Wasserstraßen vergleichsweise umweltfreundliche Verkehrswege. Dass dieser Verkehr und auch alle anderen anthropogenen Nutzungen in einem hochwertigen und sensiblen ökologischem Umfeld erfolgen, ist gleichermaßen mit hohem Anspruch zu beachten. Gemeinsame verkehrliche und wasserwirtschaftliche Unterhaltung des Rheins sichern – zumindest außerhalb der Industrie- und Stadtgebiete – eine weitmöglichst naturnahe Struktur der Ufer.

Die Folgenabschätzung eines Klimawandels für die Nutzbarkeit als Verkehrsweg und für die Unterhaltungs- und Anpassungsstrategien für das Ökosystem Gewässer-Ufer-Aue-Land kann daher nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Quelle: GDWS (Generaldirektion Wasserstraße)

7.1 KLIMA IM RHEIN-EINZUGSGEBIET

Das methodische Vorgehen der Modellierung entlang der KLIWAS-Modellkette ist in Kapitel 3.4 beschrieben. Die Ergebnisse der Klimamodellierung für das Rhein-Einzugsgebiet sind in Tabelle 9 dargestellt.



Tabelle 9: Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Rhein-Einzugsgebiet
Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990

| RHEIN | | 2021 BIS 2050 | 2071 BIS 2100 |
|-----------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|
| Lufttemperatur Sommer | Rhein | +1 °C bis +2 °C | +3 °C bis +5 °C |
| | Hochrhein / Alpenrhein | +1,5 °C bis +2,5 °C | +4 °C bis +5 °C |
| | Oberrhein / Neckar | +1 °C bis +2 °C | +3,5 °C bis +5 °C |
| | Mosel | +1 °C bis +2 °C | +3 °C bis +5 °C |
| | Main | +1 °C bis +2 °C | +3 °C bis +4,5 °C |
| | Maas | +1 °C bis +2 °C | +3 °C bis +4,5 °C |
| | Mittel-, Niederrhein | +1 °C bis +2 °C | +3 °C bis +4 °C |
| Lufttemperatur Winter | Rhein | +0,5 °C bis +2,5 °C | +2 °C bis +5 °C |
| | Hochrhein / Alpenrhein | +1 °C bis +2,5 °C | +3 °C bis +4,5 °C |
| | Oberrhein / Neckar | +1 °C bis +2,5 °C | +3 °C bis +4,5 °C |
| | Mosel | +1 °C bis +2,5 °C | +3 °C bis +4,5 °C |
| | Main | +1 °C bis +3 °C | +3 °C bis +5 °C |
| | Maas | +1 °C bis +2,5 °C | +2,5 °C bis +4,5 °C |
| | Mittel-, Niederrhein | +1 °C bis +2,5 °C | +3 °C bis +5 °C |
| Niederschlag Sommer | Rhein | -10 % bis +5 % | -30 % bis -10 % |
| | Hochrhein / Alpenrhein | -10 % bis +5 % | -35 % bis -15 % |
| | Oberrhein / Neckar | -15 % bis 0 % | -30 % bis -10 % |
| | Mosel | -15 % bis 0 % | -35 % bis -15 % |
| | Main | -10 % bis +5 % | -30 % bis -10 % |
| | Maas | -15 % bis +5 % | -35 % bis -15 % |
| | Mittel-, Niederrhein | -10 % bis +5 % | -30 % bis -10 % |
| Niederschlag Winter | Rhein | -5 % bis +10 % | 0 % bis +25 % |
| | Hochrhein / Alpenrhein | -15 % bis +10 % | -5 % bis +20 % |
| | Oberrhein / Neckar | -10 % bis +15 % | 0 % bis +25 % |
| | Mosel | 0 % bis +15 % | +5 % bis +25 % |
| | Main | -5 % bis +15 % | +5 % bis +25 % |
| | Maas | 0 % bis +15 % | +5 % bis +25 % |
| | Mittel-, Niederrhein | 0 % bis +15 % | +5 % bis +20 % |

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- Sowohl die Sommer- als auch die Winter-temperaturen werden in beiden projizierten Zeiträumen (2021 bis 2050 bzw. 2071 bis 2100) steigen.
- Für die Niederschläge sind in der nahen Zukunft weder im Winter noch im Sommer eindeutige Trends erkennbar.
- In der fernen Zukunft können die Niederschläge im Sommer abnehmen und im Winter zunehmen.

Wie für ganz Deutschland, so ist für das Rhein-Einzugsgebiet im Mittel mit Temperaturanstiegen um +1 bis +2,5 °C bis Mitte des Jahrhunderts, bzw. um bis zu +5 °C bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Für die Niederschläge können wir bis zur Mitte des Jahrhunderts weder für den meteorologischen Winter (Dezember bis Februar), noch für den meteorologischen Sommer (Juni bis August) eindeutige Trends erkennen. Für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) zeigen unsere Projektionen trockenere Sommer und feuchtere Winter.



© GDWS Münster

7.2 HYDROLOGIE IM RHEIN-EINZUGSGEBIET

Die oben genannten Ergebnisse sind wiederum in unsere hydrologischen Berechnungen eingegangen. Um dabei die Unsicherheit der hydrologischen Modellierung zu überprüfen, wurde im Kontext des KHR-Projektes RheinBlick2050 exemplarisch mit einem Ensemble von hydrologischen Modellen gerechnet. Es zeigt sich, dass dieser Schritt die Bandbreite erhöht. Die Bandbreite, die aus dem Ensemble unterschiedlicher Klimasimulationen herrührt, ist jedoch größer.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse für Mittel- und Niedrigwasserkennwerte an ausgewählten Pegeln im Rhein-Einzugsgebiet dargestellt. Diese basieren derzeit auf einem Ensemble von 32 (nahe Zukunft) bzw. 24 (ferne Zukunft) Abflussprojektionen unter Verwendung eines ausgewählten hydrologischen Modells. Sie sind in Form von prozentualen Abweichungen gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 bis 1990) dargestellt. Die Ergebnisbandbreiten repräsentieren Cluster innerhalb der Ensembles, in dem 70 bis 80 Prozent der Ergebnisse besonders eng zusammenliegen. Die orangefarbene Hinterlegung verweist auf eine Abflussabnahme, die blaue Hinterlegung auf eine Abflusszunahme, während die graue Hinterlegung ein uneinheitliches Änderungssignal der Projektionsergebnisse bedeutet.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- Für die mittleren Abflüsse (MQ) bzw. Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) zeigen unsere Ergebnisse für die nahe Zukunft im hydrologischen Sommer keine klare Änderung, während für den Winter eine Zunahme zu verzeichnen ist.
- MQ und NM7Q können in der fernen Zukunft in den Sommermonaten abnehmen. Im Winter setzt sich die zunehmende Tendenz fort.

Tabelle 10: Mittel- und Niedrigwasserkennwerte (MQ und NMQ) für den Rhein

| PARAMETER | PEGEL | SZENARIENKORRIDORE | |
|---|-----------------|------------------------------|-------------------------------|
| | | ÄNDERUNG [%] NAHE ZUKUNFT | ÄNDERUNG [%] FERNE ZUKUNFT |
| MQ [m3/s] Hydrologischer Sommer (Mai–Okt) | Basel | -10 % bis +5 % | -25 % bis -10 % |
| | Kaub | -10 % bis +10 % | -25 % bis -10 % |
| | Lobith | -10 % bis +10 % | -25 % bis -10 % |
| | Raunheim (Main) | 0 % bis +25 % | -20 % bis +10 % |
| | Trier (Mosel) | -5 % bis +10 % | -25 % bis -5 % |
| MQ [m3/s] Hydrologischer Winter (Nov–Apr) | Basel | 0 % bis +20 % | +5 % bis +25 % |
| | Kaub | 0 % bis +20 % | +5 % bis +25 % |
| | Lobith | 0 % bis +15 % | +5 % bis +25 % |
| | Raunheim (Main) | 0 % bis +25 % | +15 % bis +40 % |
| | Trier (Mosel) | 0 % bis +20 % | +10 % bis +30 % |
| NM7Q [m3/s] Hydrologischer Sommer (Mai–Okt) | Basel | -10 % bis +10 % | -20 % bis -10 % |
| | Kaub | -10 % bis +10 % | -25 % bis -10 % |
| | Lobith | -10 % bis +10 % | -30 % bis -10 % |
| | Raunheim (Main) | 0 % bis +20 % | -20 % bis 0 % |
| | Trier (Mosel) | -20 % bis +20 % | -50 % bis -20 % |
| NM7Q [m3/s] Hydrologischer Winter (Nov–Apr) | Basel | +5 % bis +15 % | 0 % bis +15 % |
| | Kaub | 0 % bis +15 % | -5 % bis +15 % |
| | Lobith | 0 % bis +15 % | -5 % bis +15 % |
| | Raunheim (Main) | +5 % bis +15 % | 0 % bis +20 % |
| | Trier (Mosel) | -15 % bis +15 % | 0 % bis +20 % |

Unsere Ergebnisse (siehe Tabelle 10) zeigen Zunahmen der Mittel- und Niedrigwasserabflüsse im hydrologischen Winter³⁷ für beide Projektionszeiträume (2021 bis 2050, 2071 bis 2100) an. Im hydrologischen Sommer³⁸ sind unsere Ergebnisse für die nahe Zukunft indifferent, für die ferne Zukunft ist eine Abflussabnahme zu verzeichnen.

7.3 BEWERTUNGEN FÜR DIE BINNENSCHIFFFAHRT UND DIE VERLADENDE WIRTSCHAFT AM RHEIN

Wir haben die mögliche zukünftige Betroffenheit der verladenden Wirtschaft anhand eines optimistischen und eines pessimistischen Abflussszenarios bestimmt. Diese Szenarien repräsentieren die Bandbreite der Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse (Kennwert $NM7Q_{Sommer}$), die wir für den Mittelrhein (Pegel Kaub) ausgehend von 20 Klimamodellketten simuliert haben. Im Zeitraum 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) zeigt das optimistische Szenario eine positive Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse ($NM7Q_{Sommer}$, Kaub +10 Pro-

37 Hydrologischer Winter: November bis April.

38 Hydrologischer Sommer: Mai bis Oktober.

zent) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 bis 1990), während das pessimistische Szenario eine Abnahme anzeigt (NM7Q_{Sommer}, Kaub -10 Prozent). Im Zeitraum 2071 bis 2100 (ferne Zukunft) weist auch das optimistische Szenario abnehmende Niedrigwasserabflüsse aus (NM7Q_{Sommer}, Kaub -10 Prozent). Der Rückgang, der durch das pessimistische Szenario für diesen Zeitraum vorgegeben wird, ist deutlich (NM7Q_{Sommer}, Kaub -25 Prozent).

Unter normalen (günstigen) Abfluss- und Abladebedingungen haben große Schiffe gegenüber kleineren Schiffstypen deutliche Kostenvorteile je transportierter Tonne, da sie mehr Ladung bei einer Fahrt mitnehmen können. Allerdings ist die Sensitivität gegenüber Niedrigwassersituationen auch höher. Für die Schifffahrt gilt im Falle des optimistischen Szenarios: Die großen Schiffstypen können die günstigen Bedingungen des optimistischen Abflussszenarios im Zeitraum 2021 bis 2050 besser in Kostenvorteile umsetzen (z. B. Kostenreduktion bis 0,25 Euro-Cent je tkm³⁹ für den GMS110-Koppelverband auf der Relation Rotterdam–Oberrhein) als kleinere Schiffstypen (z. B. keine nennenswerte Kostenreduktion für Gustav-Koenigs-Schiffe).

Für die Schifffahrt gilt unter Annahme des pessimistischen Szenarios: Auf der Relation Rotterdam–Oberrhein ergeben sich in der Bergfahrt für trockenes Massengut im langjährigen Jahresmittel je nach Schiffstyp Kostensteigerungen von 0,08 bis 0,25 Euro-Cent je tkm, wobei die Kostensteigerungen tendenziell mit der Schiffsgröße zunehmen.

Auch die verladende Wirtschaft ist durch veränderte Abflussbedingungen und Transportkapazitäten der Schiffe betroffen. Unter den Rahmenbedingungen des optimistischen Szenarios (NM7Q_{Sommer}, Kaub +10 Prozent) ist die heutige Lagerhaltung auch in der nahen Zukunft über das gesamte Jahr hinweg erreichbar. Für die ferne Zukunft (NM7Q_{Sommer}, Kaub -10 Prozent) betragen die Abweichungen allerdings bis -25 Prozent (maximaler langjährig gemittelter Monatswert, Oktober).

Für das pessimistische Szenario gilt: Für die nahe Zukunft kann die optimale Lagerhaltung nicht ganzjährig erreicht werden, Abweichungen ergeben sich vor allem im Herbst. Für die ferne Zukunft ergeben sich unter Annahme eines möglichen, stark pessimistischen Abflussszenarios (NM7Q_{Sommer}, Kaub -25 Prozent) Abweichungen von der optimalen Lagerhaltung von bis zu 45 Prozent (maximaler langjährig gemittelter Monatswert, November).

Diesen Szenarien kann durch Anpassungsmaßnahmen begegnet werden. Dies betrifft die Schiffstechnik, den Schiffsbetrieb, die Flottenstruktur und die Unternehmenslogistik.

³⁹ tkm = Tonnenkilometer, t * km.

7.4 SEDIMENTE, FLUSSBETTENTWICKLUNG UND SCHADSTOFFE IM RHEIN

Für die Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen sind neben dem Abfluss der Sedimenthaushalt und die Entwicklung des Gewässerbettes entscheidend. Dabei erfordern sowohl Anlandungstendenzen von Sedimenten als auch großräumige und langfristige Abtragstendenzen durch geringe Sedimentzufuhr aus dem Oberstrom eine aktive Gewässerbewirtschaftung. Die zuvor in Kapitel 7.2 dargestellten möglichen großräumigen hydrologischen Änderungen können Einfluss auf die Fahrrinntiefen und auf den für deren Gewährleistung notwendigen Unterhaltungsaufwand haben (siehe Abbildung 7). Deshalb haben wir die Auswirkungen der potenziellen Klimaänderungen auf den natürlichen Feststofftransport an den Bundeswasserstraßen ermittelt und bewertet.

Um dieses Ziel zu erreichen, haben wir in den ersten Jahren der Projektlaufzeit morphologische Modelle aufgrund unseres Systemverständnisses umfänglich modifiziert. Ferner haben wir eine Sensitivitätsanalyse für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100), basierend auf vorhandenen morphologischen Daten für das Jahr 2004, durchgeführt.

Die aus dem KLIWAS-Ensemble ausgewählte Projektion ist durch annähernd gleichbleibende Mittelwasser-(MQ-)Verhältnisse für die nahe und ferne Zukunft sowie eine durchschnittlich zehnpromtente Erhöhung des höchsten arithmetischen Mittels des Abflusses an sieben aufeinanderfolgenden Tagen (HM7Q) für die ferne Zukunft charakterisiert.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Unterhaltungsstrategie, zumindest für die nahe Zukunft, einen weitaus größeren Einfluss auf die Sohlagenentwicklung und den Sedimenthaushalt besitzt, als die Änderung aus einer klimabedingt veränderten Abflusscharakteristik des Flusseinzugsgebietes. Für den Gesamtrhein zeigt die Sohlentwicklung für die oben genannte Projektion mit konstanten Baggerungen und Zugaben auf heutigem Niveau für die nahe Zukunft wenig ausgeprägte Unterschiede zwischen den drei bisher gerechneten Zeitsegmenten: des Referenzzeitraums, der nahen und der fernen Zukunft. Lediglich lokal sind stärkere Abweichungen erkennbar (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Gemäß der hydrologischen Projektion für die ferne Zukunft ergibt sich eine Tendenz zu verstärkter Erosion (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10).

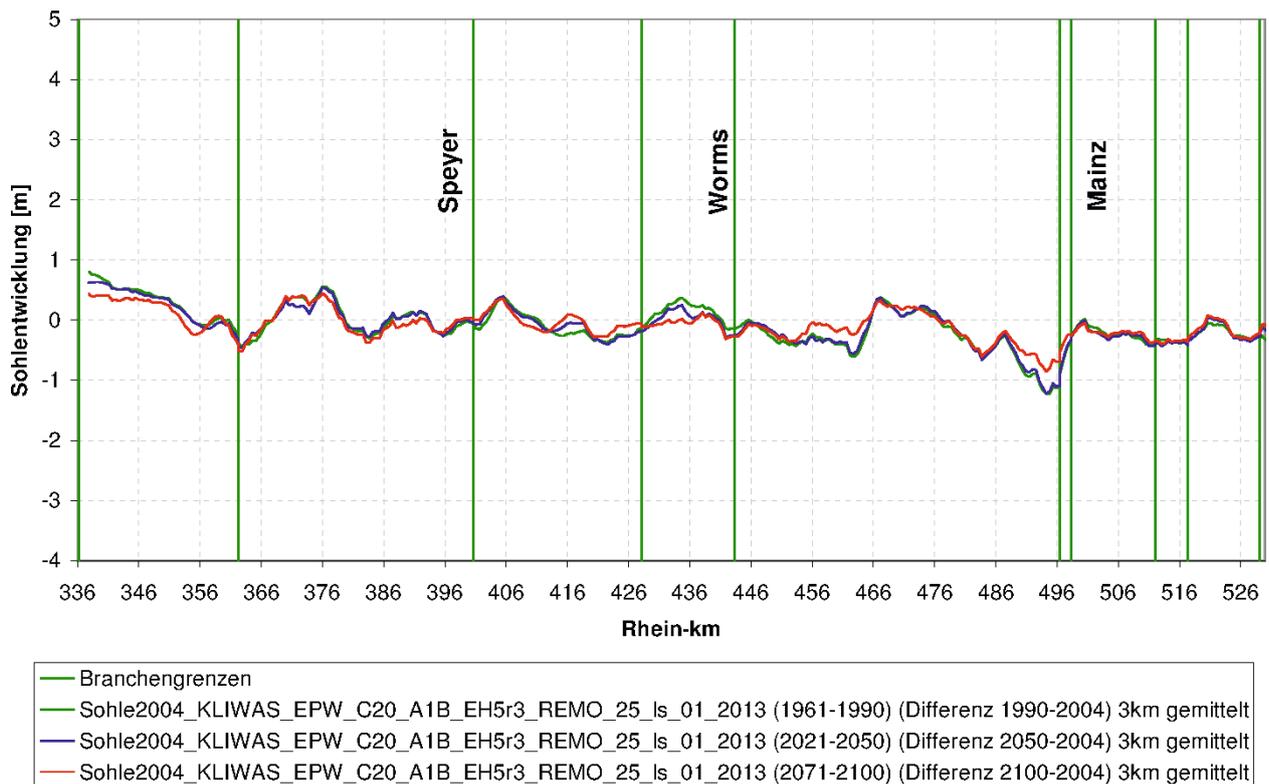


Abbildung 7: Sohlentwicklung für den Referenzzeitraum, die nahe Zukunft und die ferne Zukunft für die Projektionen HBV134-EPW-C20_A1B_EH5r3_Remo_25_Is. (Oberrhein).

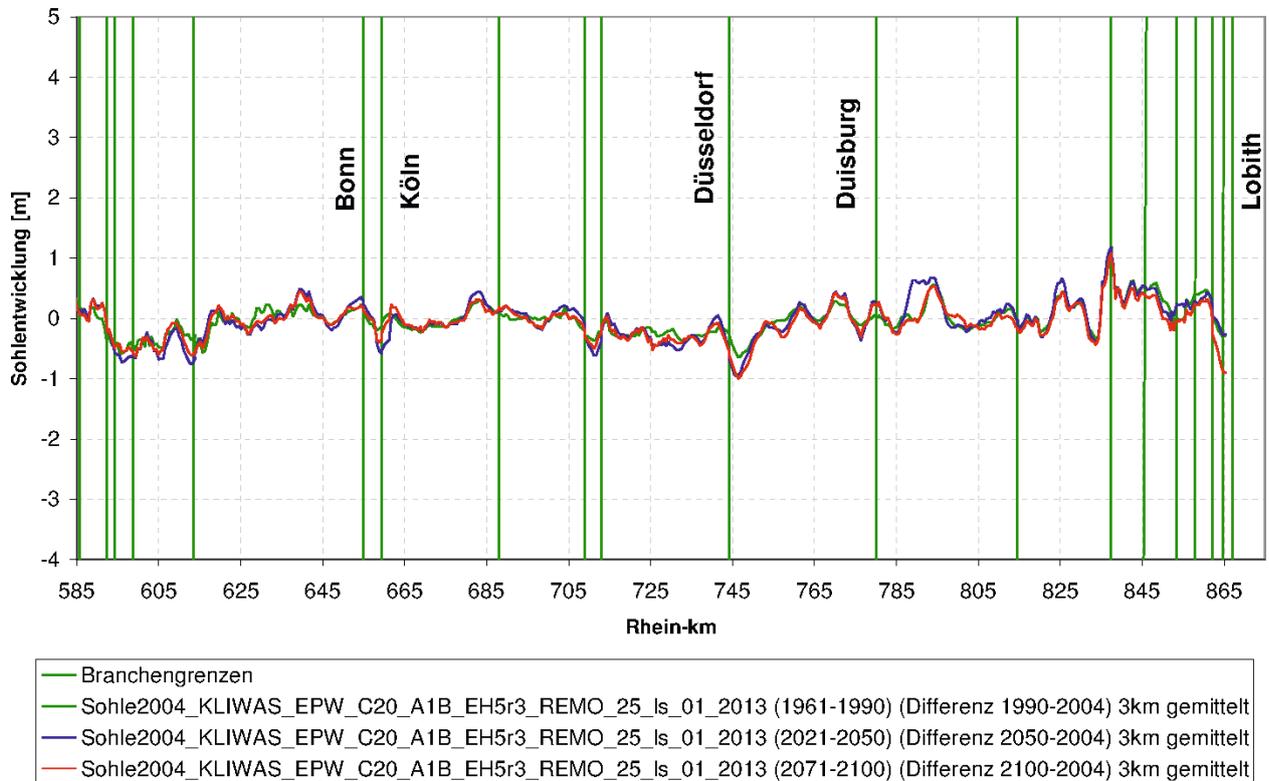


Abbildung 8: Sohlentwicklung für den Referenzzeitraum, die nahe Zukunft und die ferne Zukunft für die Projektionen HBV134-EPW-C20_A1B_EH5r3_Remo_25_Is. (Niederrhein).

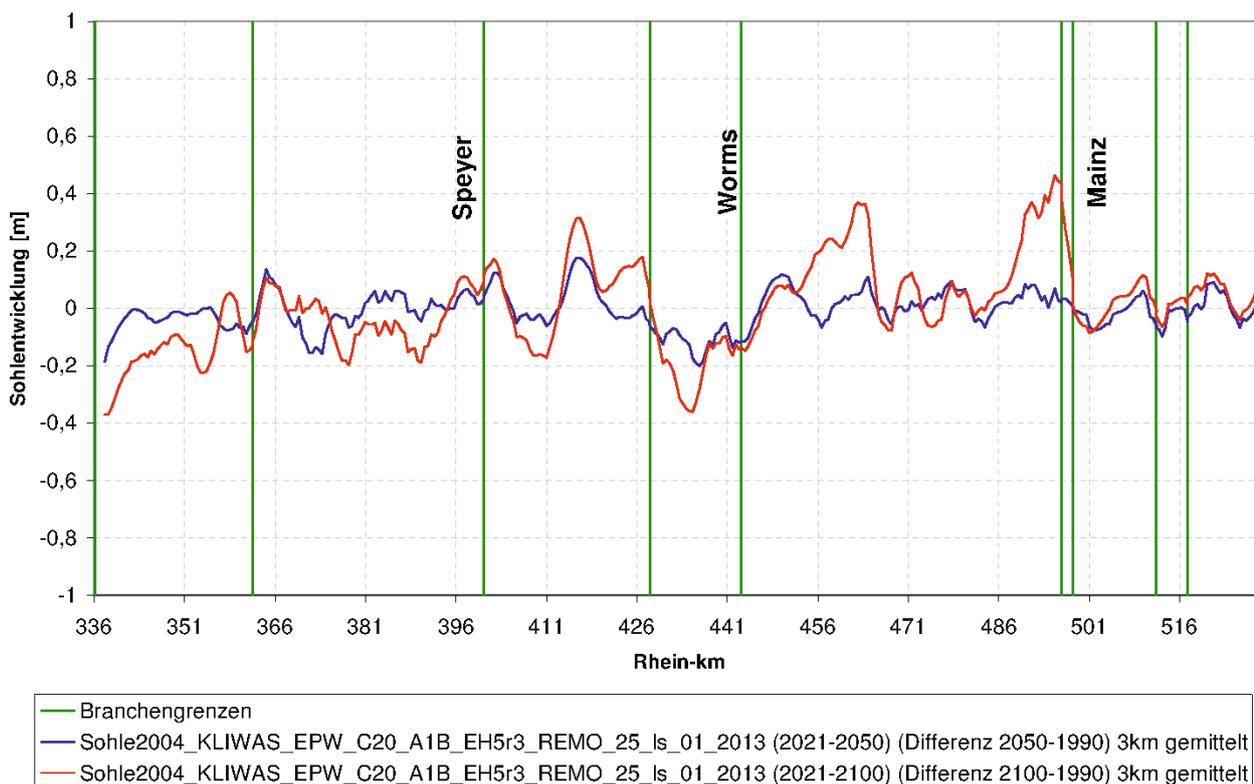


Abbildung 9: Relative Sohlentwicklung der nahen Zukunft und der fernen Zukunft für die Projektionen HBV134-EPW-C20_A1B_EH5r3_Remo_25_Is zum Referenzzeitraum (1961-1990). (Oberrhein).

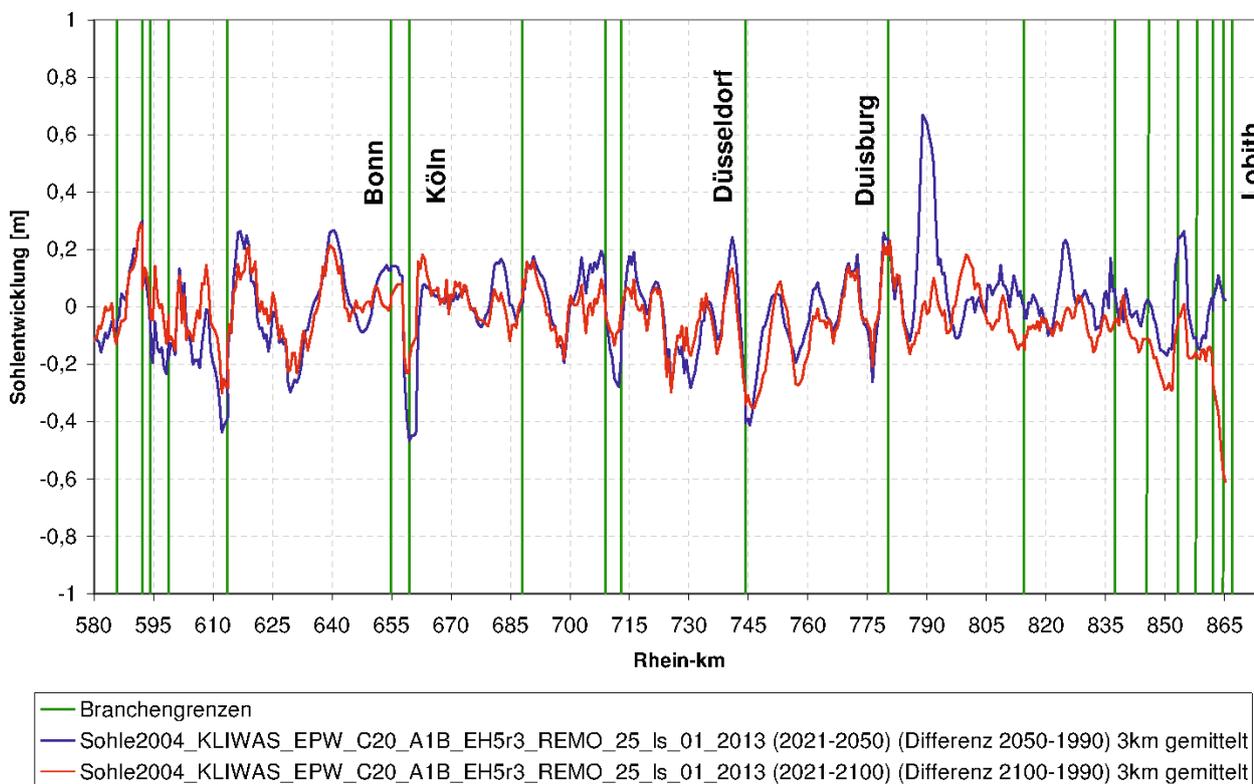


Abbildung 10: Relative Sohlentwicklung der nahen Zukunft und der fernen Zukunft für die Projektionen HBV134-EPW-C20_A1B_EH5r3_Remo_25_Is zum Referenzzeitraum (1961-1990). (Niederrhein).

Für die nahe Zukunft sind lokal zwar gravierende morphologische Änderungen möglich, jedoch ist im Mittel die Summe aus Erosion und Sedimentation gleichbleibend. Lediglich bei einer separaten Betrachtung des Rheins in Oberrhein (km 336 bis 580) und Niederrhein (km 580 bis 865) ist für die ferne Zukunft erkennbar, dass der Niederrhein stärker durch ein Klimaänderungssignal betroffen sein kann als der Oberrhein. Allerdings weicht die für den Niederrhein gemittelte Sohlhöhenänderung bis 2100 vom Sohlzustand 2004 nur um wenige cm ab.

In den vorherigen Abbildungen ist der Mittelrhein von Bingen bis Boppard (km 530 bis 580) nicht abgebildet. Diesen äußerst komplexen Flussverlauf kann das 1D-Modell morphologisch nicht hinreichend simulieren.

Sedimentumlagerungen führen, sofern die Sedimente schadstoffbelastet sind, zu einem unkontrollierten stromabwärtsgerichteten Schadstofftransport. Durch diesen Prozess können seichte Flussabschnitte, Vorländer oder Ästuare, welche weit entfernt von der Verschmutzungsquelle liegen, durch die partikulär gebundenen Schadstoffe belastet werden. Da die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) explizit den „guten chemischen Zustand“ bzw. das „gute chemische Potenzial“ für alle Gewässer fordert, ist dieser Aspekt für alle Wasserstraßen und deren Unterhaltung von Bedeutung.

Grundlage der Modellierung klimabedingter Änderungen von Schadstoffgehalten in Sedimenten und Schwebstoffen bildet zum einen die Erfassung des Ist-Zustandes des Sedimenthaushalts. Unsere Daten zeigen, dass die Stauhaltungen entlang des deutsch-französischen Oberrheins den Sedimenthaushalt und damit die Schwebstofffrachten deutlich beeinflussen. Für die Stauhaltung in Iffezheim haben wir ein dreidimensionales Feststofftransportmodell aufgebaut. Dieses Modell errechnet – wie es auch die erhobenen Peildaten beweisen – höchste Anlandungsraten bei erhöhten Abflüssen. In Niedrigwasserphasen wird das abgelagerte Material konsolidiert, anschließend reduziert sich die Ablagerungshöhe. Die bestehenden Unsicherheiten bezüglich Erosion in der Stauhaltung bei hohen Abflüssen werden zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses in situ und im Labor weiter untersucht. Darüber hinaus wurde in gleicher Weise wie im Elbe-Einzugsgebiet die Bodenerosion und der daraus resultierende Sedimenteintrag für fünf Klimaprojektionen modelliert. Während klimabedingt zunehmende Feinsedimenteinträge aus dem Alpenraum in den Rhein relevant sind, konnte in den Simulationsrechnungen kein Klimaänderungssignal hinsichtlich des Feinsedimenteintrags aus den Böden der Einzugsgebiete für den Main, die Mosel und den Neckar festgestellt werden.

Zum anderen haben wir langjährige Datenreihen zur Ermittlung des Ist-Zustandes der partikulär gebundenen Schadstofffracht ausgewertet. An der Messstelle Koblenz nahm die Fracht für Hexachlorbenzol (HCB) zwischen 1985 und 1995 deutlich ab und stagniert seither. Die Frachten für die Kongenere PCB-138 und PCB-153 (polychlorierte Biphenyle) stagnieren im Zeitraum 1995 und 2007 ebenso.

Maßnahmen zur Erkundung von schadstoffbelasteten Sedimenten im Gewässerbett entlang des Oberrheins (sogenannte sekundäre Quellen) sind notwendig, um Sicherungsmaßnahmen bzw. eine Entfernung dieser potenziellen Belastungsquellen vorzunehmen, um die Erreichung der Umweltqualitätsziele der IKSR für den stromabliegenden Flussbereich nicht zu gefährden.

7.5 WASSERBESCHAFFENHEIT IM RHEIN

Für das durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie gesetzte Ziel des „guten ökologischen Zustandes bzw. Potenzials“ ist es notwendig, die Entwicklung der Wasserbeschaffenheit, insbesondere der Wassertemperatur, des Sauerstoffgehalts und des Algenwachstums für die Zukunft abzuschätzen. Für diesen Zweck haben wir das durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde erstellte Modell QSim genutzt und weiterentwickelt.

Zahlreiche Wärmeeinleitungen überprägen den Temperaturhaushalt des Rheins. Die Simulationsläufe zeigen, dass die Wassertemperaturen des Rheins in der nahen Zukunft klimabedingt zusätzlich in ähnlichem Maße erhöht werden, wie dies durch genehmigte Einleitungen bereits geschieht. Das bedeutet, dass der Effekt des Klimawandels durch reduzierte Wärmeeinleitungen zumindest zeitweise gedämpft werden kann. In der fernen Zukunft wirkt sich die klimabedingte Temperaturerhöhung stärker aus und liegt im frei fließenden Abschnitt des Rheins zwischen Karlsruhe und Bimmen bei rund 2 °C (Jahresmittelwert über neun Messstationen). Am deutlichsten steigt die Wassertemperatur im August (2,6 – 3,4 °C; siehe Abbildung 11).

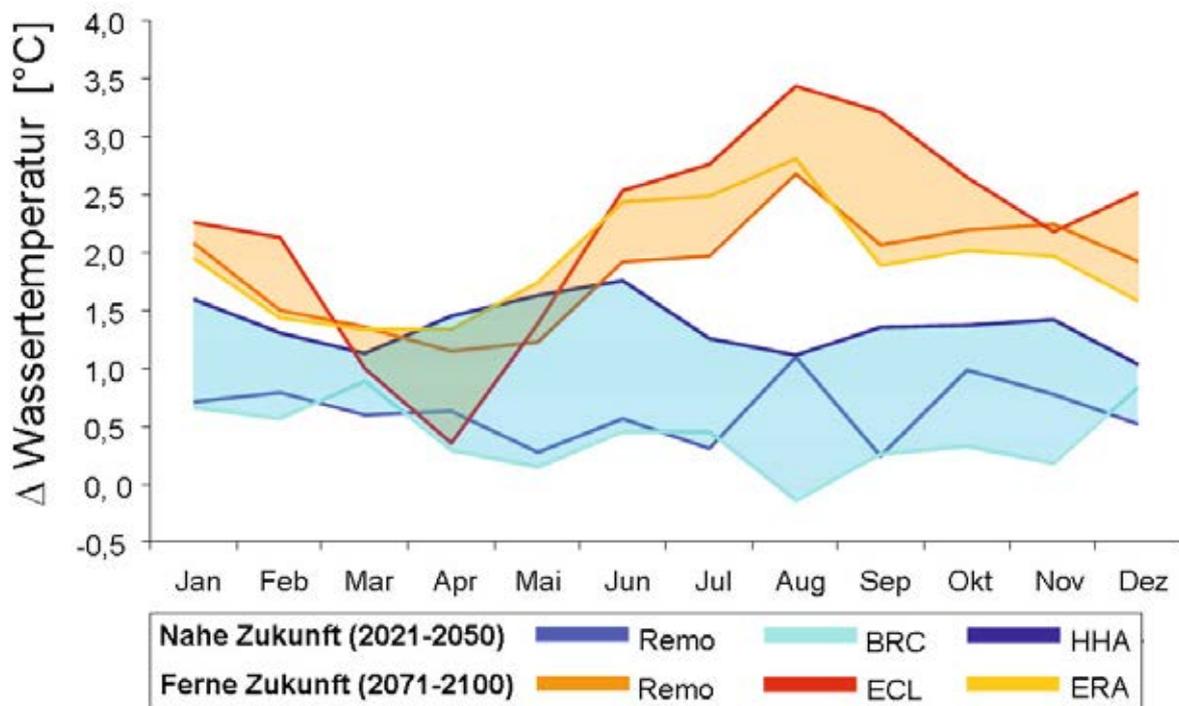


Abbildung 11: Projizierte Änderungen der Wassertemperatur (Monatsmittel) der Bandbreite der Modellketten verglichen mit der Referenzperiode (1961–1990). Dargestellt sind Mittelwerte von 9 Messstationen auf der frei fließenden Rheinstrecke zwischen Karlsruhe und Bimmen.

Modellketten: REMO = C20-A1B_ECHAM5r3_REMO-ENS;
 BRC = C20-A1B_BCM_RCA3
 HHA = C20-A1B_HADCMQ0_HADRMQ0
 ERA = C20-A1B_ECHAM5r3_RACMO
 ECL = C20-A1B_ECHAM5r1_CLM24

Trotz der Erhöhung der Wassertemperaturen sind die Auswirkungen auf die Sauerstoffkonzentrationen im Rhein gering. Sie werden im Wesentlichen durch die geringere physikalische Löslichkeit des Sauerstoffs bei höheren Wassertemperaturen leicht reduziert. Ebenfalls gering sind die Auswirkungen veränderter Abflüsse und Wassertemperaturen auf die Algenentwicklung; sie liegen im Bereich der Mess- und Modellunsicherheiten.

Dieser geringe Klimaeffekt liegt daran, dass offensichtlich die Wassertemperatur nicht der wichtigste Steuerungsfaktor der Algen im Rhein ist und dass die projizierten Abflussänderungen im Frühjahr, zur Hauptblütezeit der Algen, moderat ausfallen (siehe Kapitel 7.2). Hingegen können, als indirekte Folge des Klimawandels, durch den Anstieg der Wassertemperaturen Nahrungsnetzeffekte ausgelöst werden. Dies wäre der Fall, wenn zum Beispiel bestimmte Muschelarten als Fressfeinde der Algen bei hohen Wassertemperaturen ausfallen. Solche Effekte sind Gegenstand geplanter Untersuchungen. Sie könnten die Gewässergüte deutlicher beeinflussen, als es der direkte Effekt des Klimawandels vermag.

7.6 WASSERBAULICHE ANPASSUNGSOPTIONEN FÜR DEN OBER-/MITTEL RheIN

Nach dem derzeitigen Stand der KLIWAS-Forschungen sind für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) keine eindeutigen Änderungen der Niedrigwasserabflüsse erkennbar. Für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) sind jedoch eine Verschärfung lang anhaltender Niedrigwasserphasen und Überschreitungen vom HSW möglich. Für die Rheinschifffahrt bedeutet dies Einbußen der Wirtschaftlichkeit sowie der Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffsverkehrs. Dem kann unter anderem mit weiter angepassten Binnenschiffen, der Logistik der betreffenden Unternehmen (z. B. Energiebranche) und mit wasserbaulichen Maßnahmen begegnet werden.

Die Schiffbarkeit der Wasserstraßen beruht auf der durchgehenden Verfügbarkeit von Mindestfahrrinntiefen bei Bezugswasserständen, wie z. B. dem Gleichwertigen Wasserstand (GIW). Der Unterhaltungsaufwand zur Gewährleistung dieser Fahrrinntiefen wird durch einen veränderten Sedimenttransport in den verschiedenen Teilstrecken der Wasserstraßen beeinflusst und jedenfalls durch eine Absenkung des von der Hydrologie abhängigen Bezugswasserstandes erhöht.

Wir sehen ein hohes verkehrswasserbauliches Anpassungspotenzial an den Klimawandel. Anpassungsoptionen zur Verminderung des steigenden Unterhaltungsaufwands wurden von uns mit fahrdynamischen und hydraulisch-morphodynamischen Methoden bewertet. Als zielführend erwiesen sich konventionelle und temporär wirksame Regelungsmaßnahmen sowie die Unterhaltung einer abgestuften Fahrrinne, bei der die heutige Fahrrinntiefe nur noch auf einer eingeschränkten Breite erhalten wird. Erhöhte Anlandungs- oder Erosionstendenzen können weiterhin durch die Anpassung ortsspezifischer Unterhaltungsmaßnahmen kompensiert werden.

Die Option einer generellen Reduktion der heutigen Fahrrinnenbreite an Tiefenengstellen oder alternativ einer abgestuften Fahrrinne, haben wir zwischen Mainz und St. Goar (Ober- und Mittelrhein) untersucht und im Naturversuch getestet. Danach können nahezu alle heutigen Verkehre weiterhin stattfinden und nur wenige Fahrzeuge müssten Begegnungen und Überholungen in andere Streckenabschnitte ohne Tiefenprobleme verlagern. Bei Niedrigwasser kommt hinzu, dass die Schiffe generell kleinere

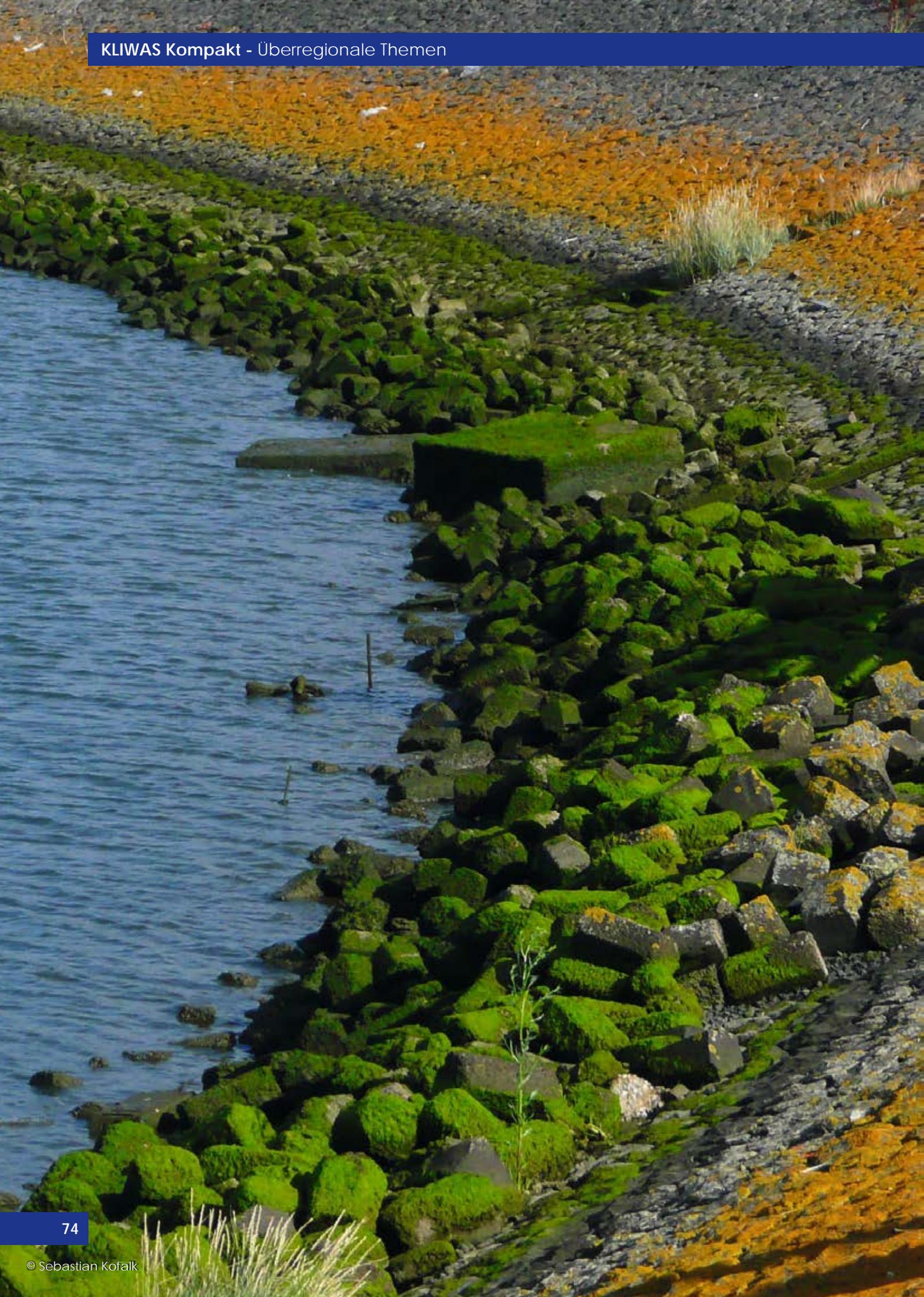
Verkehrsflächen benötigen und deshalb in der abgestuften Fahrrinne durch Breitereinschränkungen weniger betroffen sind als bei höheren Wasserständen, für die die Fahrrinne üblicherweise bemessen wird.

Die von uns erarbeiteten und bewerteten Anpassungsoptionen sind in einem hohen Maße streckenspezifisch. So sind in Strecken mit hohem Verkehrsaufkommen mögliche Wartezeiten vor Abschnitten mit Breitenengstellen relevant, d. h. die Breitenreduktion muss die verkehrlichen Belange berücksichtigen. Wasserbauliche Maßnahmen, wie die Begrenzung der Strömung hinter einer Insel zur Erhöhung der Wasserstände in der Fahrrinne, sind ebenfalls von den jeweiligen lokalen Randbedingungen, z. B. der Art der Gewässersohle (Fels- oder Kiessohle) abhängig. Die oben geschilderten Ergebnisse sind folglich nicht auf andere Strecken und/oder andere Flussgebiete übertragbar, wohl aber die im Rahmen der KLIWAS-Projekte entwickelten Untersuchungsmethoden.

Gewässerchemische und -ökologische Untersuchungen sind für alle Flussgebiete im Kapitel 8 dargestellt.







8. ÜBERREGIONALE THEMEN

8.1 KLIWAS-KLIMATOLOGIE

NIEDERSCHLÄGE

Im Beobachtungszeitraum (1951 bis 2006) zeigen die mittleren Winterniederschläge generell Zunahmen von +20 bis zu +30 Prozent im Nordwesten, im Süden und Osten +5 bis +25 Prozent. Die Tendenzen sind für den Sommer nur schwach ausgeprägt, im Osten Deutschlands zeigen sich Abnahmen bis um -12 Prozent. Durch Ensembleauswertungen der Klimamodelle zeigt sich für die Zukunft eine Tendenz zur Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten, während in den Wintermonaten eine Niederschlagszunahme wahrscheinlich ist. Die projizierten relativen Änderungen des mittleren Sommerniederschlags weisen eine Spanne zwischen einer sehr geringen und einer Abnahme von bis zu -15 Prozent für den Zeitraum 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) und bis zu -25 Prozent für den Zeitraum 2071 bis 2100 (ferne Zukunft) aus. Einige wenige Klimamodelle zeigen für vereinzelte Regionen auch eine leichte Zunahme der Sommerniederschläge.

LUFTEMPERATUR

Das Jahresmittel der Lufttemperatur als Mittel des KLIWAS-Auswertebereiches (Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete) ist in der Beobachtungsperiode 1951 bis 2006 um +1,1 bis +1,4 °C angestiegen. Für die nahe Zukunft ist für Deutschland eine Zunahme des Jahresmittels der Lufttemperatur von mindestens +0,5 °C zu erwarten. Dabei ist eine Temperaturzunahme um mehr als +2 °C (Norddeutschland) bzw. +2,5 °C (Süddeutschland) jedoch eher unwahrscheinlich. Für die ferne Zukunft kann eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von mindestens +1,5 °C und maximal +3,5 °C in Norddeutschland bzw. +4 °C in Süddeutschland als wahrscheinlich angesehen werden.

GLOBALSTRAHLUNG

Die mittleren Werte der Globalstrahlung werden sich bis zur Mitte des Jahrhunderts wenig ändern. Für das Ende des Jahrhunderts kann von einer Abnahme der Globalstrahlungswerte in den Wintermonaten um -5 bis -20 Prozent und einer leichten Zunahme in den Sommermonaten (bis zu +10 Prozent in Norddeutschland, maximal +15 Prozent in Süddeutschland) ausgegangen werden.

KENNWERTE

Aus den Referenz- und Klimasimulationsdaten können auch Kennwerte wie „Heiße Tage“ und „Eistage“ mithilfe der Temperaturtagesmaxima berechnet werden. Unter der Annahme eines mittleren Tagesgangs wurden Maxima bei den Beobachtungsdaten abgeschätzt.

HEISSE TAGE

Die Kennzahl „Heiße Tage“ stellt z. B. mit einer Auszählung der jährlichen Tage mit Maximumtemperatur von mindestens 30 °C eine Maßzahl für ein „extremes Wetter“ dar: Die Anzahl heißer Tage ist im Zeitraum 1951 bis 2006 um 4 bis 5 Tage gestiegen. Sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft ist es wahrscheinlich, dass die Anzahl „Heißer Tage“ weiter zunehmen wird. Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist es dabei wahrscheinlich, dass die Anzahl heißer Tage in Norddeutschland um 5 bis 10 bzw. 10 bis 15 in Süddeutschland steigen wird. Für das Ende des Jahrhunderts ist eine maximale Zunahme der „Heißen Tage“ um 10 bis 15 Tage (Norddeutschland) bzw. 30 bis 35 Tage (Südwestdeutschland) wahrscheinlich. Aus den Projektionen einzelner Klimamodelle ergibt sich

jedoch auch eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür, dass für den gesamten betrachteten Zeithorizont die Zahl der „Heißen Tage“ in Deutschland im Wesentlichen unverändert bleibt.

EISTAGE

Ein weiterer Kennwert sind die jährlichen Eistage. Dies sind Tage, an denen die Tagesmaximumtemperatur unter 0 °C liegt. Die Anzahl der Eistage nahm von 1951 bis 2006 um 5 Tage ab. Sowohl für die nahe wie für die ferne Zukunft projizieren sämtliche Klimamodelle des verwendeten Ensembles eine weitere Abnahme der Eistage. Dies betrifft besonders den Alpenraum. Hier ist eine mittlere Abnahme zwischen 10 und 40 Tagen für den Zeitraum 2021 bis 2050 und bis zu 80 Tagen für den Zeitraum 2071 bis 2100 wahrscheinlich. Für das restliche Untersuchungsgebiet kann von einer Abnahme bis maximal 30 Tagen für die nahe Zukunft und bis zu 40 Tagen für die ferne Zukunft ausgegangen werden.

8.2 WETTERLAGENBEZOGENE AUSSAGEN FÜR DIE FERNE ZUKUNFT

WINTER (DEZEMBER, JANUAR, FEBRUAR; DJF)

Für alle Flussgebiete Deutschlands zeigen unsere Ergebnisse vermehrtes Auftreten von Wetterlagen, die zu nasserem Verhältnissen beitragen. Dies ist durch die Zunahme von Westwetterlagen verursacht, die meist mit hohen Niederschlägen einhergehen. Dies wiederum ist bedingt durch erhöhten Feuchtigkeitstransport durch maritim geprägte Westströmungen. Gleichzeitig nehmen die trockeneren Ostwetterlagen (Hochdrucklagen) leicht ab. Auch Südwestwetterlagen, die mit sehr hohen Gebietsniederschlägen verbunden sind, werden häufiger auftreten.

Die Südwestwetterlagen werden gleichzeitig zu meist sehr milden Temperaturen führen. Ferner erwarten wir erhöhte Advektion von Warmluft aus südlichen Teilen Europas, die ebenfalls mildere Wintertemperaturen bewirken wird.

SOMMER (JUNI, JULI, AUGUST; JJA)

Auch im Sommer werden sich die Wetterlagen und damit klimatische Parameter verändern: Wir erwarten eine Zunahme von antizyklonalen Westwetterlagen (Hochdruckeinfluss), die häufig niederschlagsarm oder niederschlagsfrei sein werden. Gleichzeitig nehmen die mit höheren Niederschlägen verbundenen zyklonalen (Tiefdruckeinfluss) Wetterlagen ab. Die Häufigkeit von Starkniederschlägen wird sich nach unseren Erkenntnissen hingegen nicht ändern.

Veränderte Wetterlagen werden zu wärmeren bzw. heißeren Witterungsverhältnissen beitragen. Dies wird einerseits durch warme oder heiße Südströmungen bedingt. Andererseits werden Kaltlufteinbrüche (z. B. durch Tröge mit nördlicher, kalter Strömung) im Mittel weniger kräftig ausfallen, aber weiterhin ähnlich häufig vorkommen.

8.3 EISBILDUNG

Neben Niedrigwasser- und Hochwasserereignissen kann Eisbildung auf den Bundeswasserstraßen zu Einschränkungen in der Schifffahrt führen. In der Vergangenheit waren davon vor allem die ostdeutschen Gewässer wie Oder und Elbe sowie das deutsche Kanalsystem betroffen. Während in extremen Wintern im Westen auch an staugeregel-

ten Rheinnebenflüssen Eisbildung und eisbedingte Schifffahrtssperrungen zu verzeichnen sind, ist der Rhein selbst letztmalig 1963 zugefroren. Hauptursache hierfür sind die seither zunehmenden Wärmeeinleitungen durch Kraftwerke, Industrie und Kläranlagen.

Gemäß der verfügbaren Klimaprojektionen (siehe Kapitel 8.2) ist in Deutschland sowohl in der nahen (2021 bis 2050) als auch der fernen (2071 bis 2100) Zukunft mit einer Abnahme der Tage mit Maximaltemperaturen unter 0 °C zu rechnen. Die Winterkältesumme der Lufttemperatur⁴⁰ folgt dieser Entwicklung; sie würde deutschlandweit entsprechend abnehmen. Abbildung 12 illustriert die Bandbreiten der Veränderungen basierend auf unterschiedlichen verwendeten Projektionen. Für die westlichen Flussgebiete wird deutlich, dass die größte Verringerung der mittleren Kältesumme bereits in der nahen Zukunft abgeschlossen wäre. In beiden Abbildungsteilen dominieren daher im Westen blaue Farbtöne. Für den Osten hingegen kann es aufgrund der heute noch höheren Kältesummen auch in der fernen Zukunft nochmals zu einer bedeutenderen Abnahme der Kältesummen kommen (rote Farbtöne).

Die Bewertung des vergleichsweise abstrakten Kennwerts „Kältesumme“ ist schwierig. Da er jedoch eine überwiegend gute Korrelation mit dem für die Schifffahrt relevanten Kennwert „Anzahl eisbedingter Sperrtage“ aufweist, lassen sich auf Basis der bisher dargestellten Entwicklungen Aussagen für die zukünftige Eissituation auf den deutschen Binnenwasserstraßen ableiten.

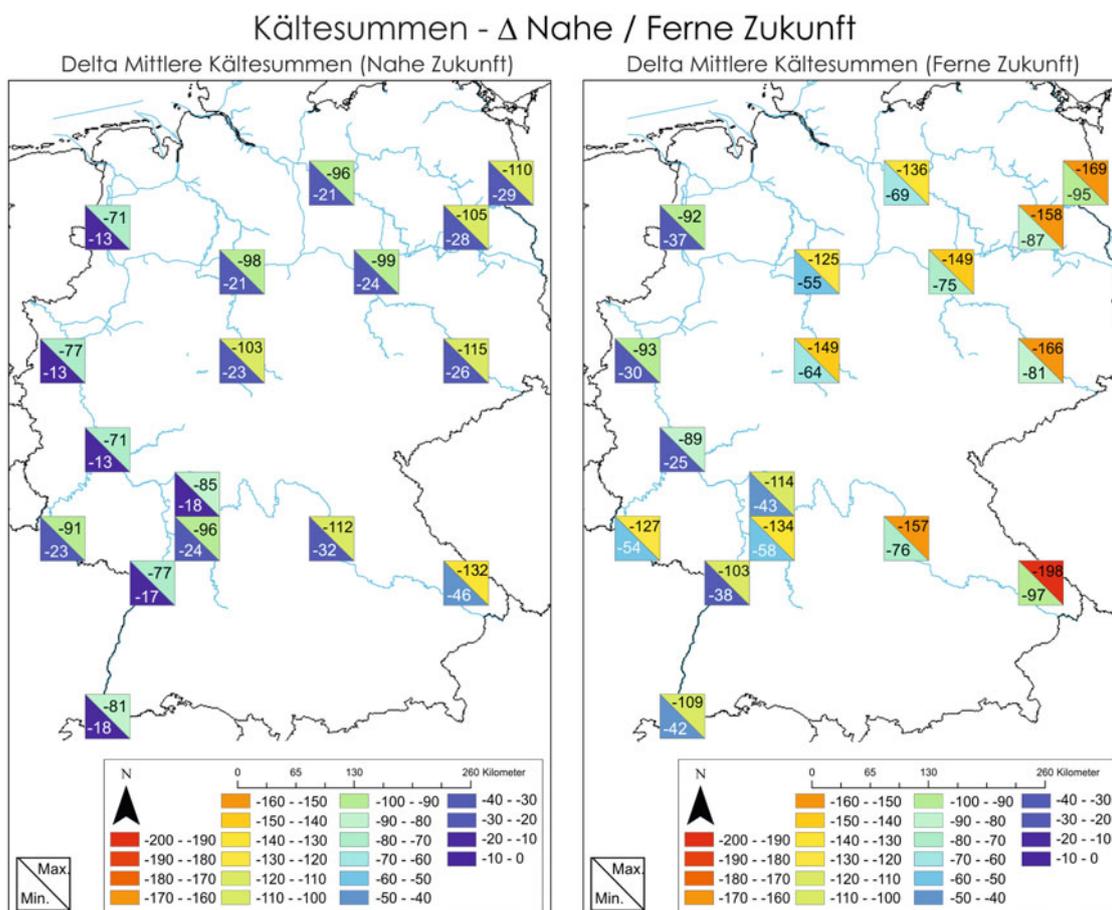


Abbildung 12: Veränderung der Kältesummen (Einheit: Kd) zwischen dem gewählten Referenzzeitraum 1971 – 2000 und der nahen (links) bzw. fernen (rechts) Zukunft in Deutschland. Ausgewählte Rasterzellen vor dem Hintergrund des Gewässernetzes der Bundeswasserstraßen. „Min.“ und „Max.“ geben die Bandbreite aus 14 (für 2021 bis 2050) bzw. 12 (für 2071 bis 2100) verwendeten KLIWAS-Modellketten an.

40 Siehe Glossar.

Für vier ausgewählte Kanalsysteme zeigt Abbildung 13 für alle untersuchten Projektionen die Bandbreite der modellierten Anzahl an Wintern (im jeweiligen 30-Jahres-Zeitraum), in denen (abgeleitet aus der Kältesumme) keine eisbedingten Sperrungen zu erwarten sind. Hieraus kann abgeleitet werden, dass...

- ... es in naher und ferner Zukunft zu einer deutlichen Zunahme der Winter ohne eisbedingte Sperrungen kommen wird.
- ... das West-Ost-Gefälle, welches im Bezugszeitraum und der nahen Zukunft noch deutlich ausgeprägt ist, sich in der fernen Zukunft nahezu auflösen wird.
- ... vor allem in der nahen Zukunft die Modellergebnisse für die östlichen Kanalsysteme eine größere Bandbreite als im Westen aufweisen.

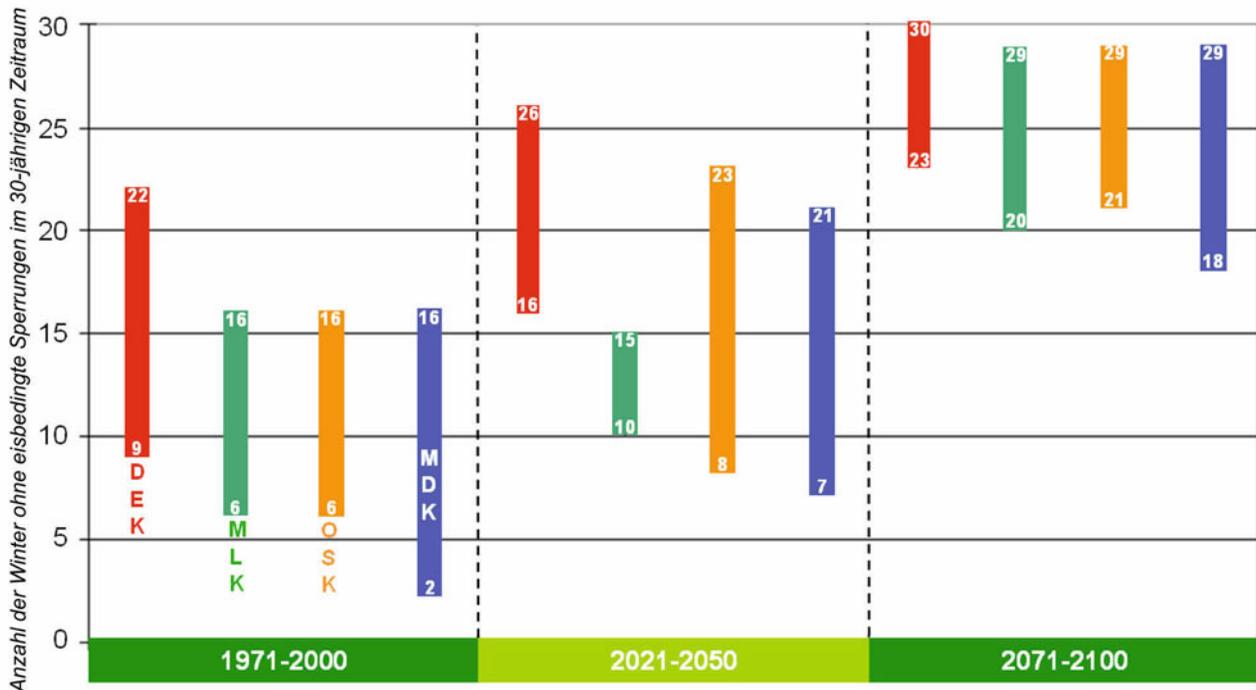


Abbildung 13: Vergleich der Winter ohne Eissperrung für die Zeiträume 1971 bis 2000, 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 an DEK (Dortmund-Ems-Kanal), MLK (Mittellandkanal), OSK (Oder-Spree-Kanal) und MDK (Main-Donau-Kanal). Die Säulen geben die Bandbreite der Ergebnisse aus 14 (für 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050) bzw. 12 (für 2071 bis 2100) verwendeten KLIWAS-Modellketten an.



Abbildung 14: Pannkucheneis auf der Elbe, Januar 2006.

© Eva Mosner

Die für die Kanäle beispielhaft dargestellte Entwicklung lässt sich qualitativ auch auf die freifließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen übertragen. Allerdings zeigen Gewässer wie der Rhein, welche stark durch Wärmeeinleitungen beeinflusst sind, bereits heute schon eine Eissituation, wie sie ansonsten wohl erst in der fernen Zukunft zu erwarten wäre.

Schiffahrtsbehindernde Eiserscheinungen werden also seltener zu erwarten sein und ggf. nahezu vollständig verschwinden. Gerade vor dem Hintergrund, dass Eis auf vielen Wasserstraßen in der nahen Zukunft, spätestens jedoch in der fernen Zukunft zunehmend die Ausnahme als die Regel sein wird und somit für Schifffahrt und Wasserstraßenbetreiber ein im Vergleich zu heute ungewöhnliches Ereignis sein wird, gilt es neu zu bewerten, wie Vorsorge getroffen wird, insbesondere ob Eisvorhersage- bzw. Frühwarnsysteme (weiter-)entwickelt werden müssen.

Zu detaillierteren Analysen, z. B. der Änderung der zeitlichen Dynamik, der Effekte veränderter Bedingungen durch Abwärmeeinleitungen, der Untersuchung lokaler Besonderheiten oder dem Vorkommen bestimmter Eistypen, wären neben einer entsprechenden Messdatenlage, der Auf- und Ausbau detaillierter gekoppelter thermisch-hydraulischer Eismodelle erforderlich.

8.4 TIERÖKOLOGIE

Durch den Klimawandel wird voraussichtlich der Charakter der heute bekannten Besiedlungsstruktur (Fauna, Taxa, Abundanzen) in Bundeswasserstraßen verändert. Dadurch werden heute bekannte Lebensgemeinschaften mit deren Indikator-Organismen für ökologische Bewertungen – zum Beispiel im Rahmen von Ausbau und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen – nicht mehr geeignet sein. Unser Ziel ist es, tierökologische Bewertungen in Planverfahren anzupassen, um eine sachgerechte Umweltverträglichkeitsprüfung von Maßnahmen auch bei klimabedingt veränderten Situationen zu gewährleisten.

METHODEN

Als notwendige Grundlage für die Ableitung eines neuen Bewertungsverfahrens führen wir vergleichende Untersuchungen an heimischen und eingewanderten Gammariden-Arten durch. Unsere Laboruntersuchungen umfassen hierbei die Bandbreite der im Forschungsprogramm KLIWAS erarbeiteten Klimaänderungen hinsichtlich Temperatur- und Abflussregime. Neben der artspezifischen Temperaturtoleranz und -präferenz (Optimum-Pessimum-Temperaturkurve) untersuchen wir im Labor die Stoffwechselaktivität, Reservestoffe sowie Strömungspräferenz verschiedener Makrozoobenthos-Arten (siehe Abbildung 16). Zusätzlich wird die Besiedlungsstruktur und artspezifische Gesundheit (Fitness) von Individuen in Bundeswasserstraßen unterschiedlicher saisonaler Temperaturregime verglichen (Rhein: winterwarm, Elbe: winterkalt).



© Michael Schlüsener

Diese Parameter können Hinweise auf unter anderem klimabedingt veränderte Lebensbedingungen sowie das artspezifische Anpassungspotenzial liefern. Die bereits vorhandene Datenbasis haben wir durch weitere Messungen mit der Art *Gammarus roeselii* (Flussflohkrebs) sowie durch Vergrößerung des Temperaturspektrums für die bereits untersuchten Arten (*Gammarus fossarum*, Bachflohkrebs, und *Dikerogammarus villosus*, großer Höckerflohkrebs) erweitert (siehe Abbildung 15).

Seit dem Vorliegen der Temperaturszenarien, insbesondere für den Rhein und die Elbe, wurde damit begonnen, die experimentell bestimmten artspezifischen Temperaturpräferenzen vor dem Hintergrund der mittel- und langfristig zu erwartenden Änderung der Temperaturregime auszuwerten.



Abbildung 15: *Dikerogammarus villosus* (großer Höckerflohkrebs, links) und *Gammarus fossarum* (Bachflohkrebs, rechts).

ERGEBNISSE

Die erfolgreichen invasiven Arten *Dikerogammarus villosus* und *Gammarus tigrinus* (Tigerflohkrebs) zeichnen sich durch große Präferenzen für hohe Temperaturlagen aus; im direkten Vergleich liegen die präferierten Temperaturen der einheimischen Arten im Durchschnitt vier bis acht Grad niedriger. Daher werden die bisher untersuchten invasiven Arten, mit Ausnahme von *Echinogammarus berilloni* (Ilgelflohkrebs), von erhöhten Wassertemperaturen eher profitieren, während die einheimischen Arten noch weiter in kühle Habitatnischen abgedrängt werden könnten. Das kritische thermische Maximum (Temperaturlimit) lag bei den invasiven Arten höher als bei den einheimischen, jedoch bei allen Arten oberhalb von 30 °C.

In Übereinstimmung mit der Temperaturpräferenz wies *Gammarus tigrinus*, gefolgt von *Dikerogammarus villosus*, die mit Abstand höchste Temperaturlimit auf. Die invasiven Arten zeigten in den Untersuchungen signifikante Akklimatisierungseffekte. Diese Effekte fehlten beim einheimischen *Gammarus fossarum* völlig. Hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit

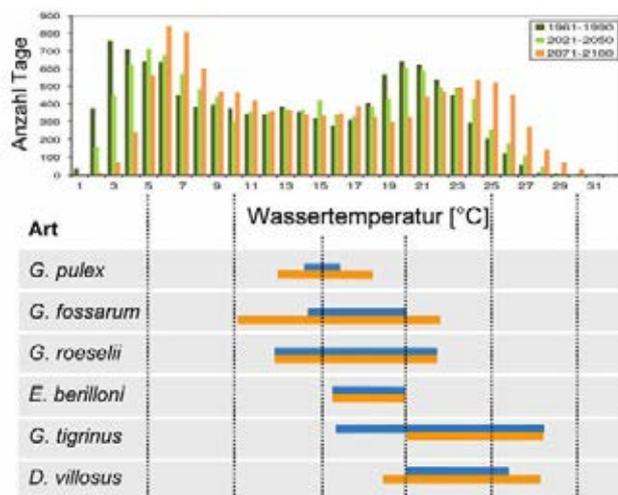


Abbildung 16: Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Temperaturpräferenzen ausgewählter Gammariden-Arten und der Tagesmitteltemperaturen (als Häufigkeitsverteilung) der nahen und fernen Zukunft. (Temperaturdaten: Projekt 5.02; A1B_ECHAM5-3_REMO5.7) blauer Querbalken: Akklimatisierung bei 15 °C; orangefarbiger Querbalken: Akklimatisierung bei 20 °C.

der Stoffwechselaktivität weisen die einheimischen Arten *Gammarus roeselii* und *Gammarus fossarum* ähnliche Eigenschaften auf.

Die Betrachtung der in den Tieren und auch in der gesamten Population vorhandenen Energiereserven bietet einen wichtigen Ansatz für die Einschätzung des Entwicklungs- und Gefährdungspotenzials einzelner Arten. Die einheimischen Arten *Gammarus fossarum* und *Gammarus pulex* zeigen eine deutliche Variation im Jahresverlauf. Aufgrund des hieraus resultierenden Energiedefizites sind Einschränkungen der Fitness der Organismen und damit ein temporär eingeschränktes Reaktions- oder Anpassungspotenzial an veränderte Umweltbedingungen möglich.

Bis Ende 2013 werden wir mindestens 20 Makrozoobenthos-Arten aus Rhein und Elbe charakterisieren. Die Auswertung und Bewertung der Ergebnisse ist zum Redaktionsschluss noch nicht abgeschlossen. Ziel ist es, klimarelevante Bewertungsverfahren im Rahmen der EU-WRRL für die Unterhaltung und den Ausbau von Wasserstraßen zu realisieren. Für dieses hoch gesteckte Ziel sind mindestens 50 bis 70 Makrozoobenthos-Arten zu charakterisieren. Daher sind die Forschungen dringend über das Jahr 2013 hinaus fortzuführen.

8.5 WASSERBAUMATERIALIEN

Wasserbaumaterialien sind ein integraler Bestandteil beim Bau und in der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen. Sie können verschiedene organische und anorganische Schadstoffe enthalten. Eine systematische Auseinandersetzung mit dem Thema Wasserbaumaterialien im Hinblick auf die Gewässerchemie und die Freisetzung von Schadstoffen lag bislang nicht vor. Aus diesem Grund wurde ein möglicher Einfluss von Baumaterialien auf die gewässerchemische Qualität von Fließgewässern untersucht. Dies geschah vornehmlich unter den Annahmen klimabedingter hydrologischer Veränderungen. Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage war zuerst die Ausarbeitung methodischer und analytischer Grundlagen unabdingbar. Deshalb wurde im Laborexperiment untersucht, inwieweit klimarelevante Parameter wie der Salzgehalt, die Wassertemperatur oder der pH-Wert die Freisetzung von Schadstoffen aus Wasserbaumaterialien begünstigen kann. Hierfür haben wir Methoden entwickelt, die insbesondere auf das Langzeitverhalten von Wasserbaumaterialien abzielen.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Die Freisetzung von Metall(oid)en aus Wasserbaumaterialien wird durch steigende Salzgehalte und geringere pH-Werte begünstigt. Die Wassertemperatur spielt eine untergeordnete Rolle.*
- *Aus Sicht der Gewässerchemie kann geschlossen werden, dass bezogen auf die untersuchten Parameter (Ionenstärke, pH, Temperatur) in Bezug auf die Wasserbaumaterialien keine Anpassung der Unterhaltungskonzepte der WSV notwendig erscheint. Deutlich wichtiger für die Freisetzung von Metallen und Metalloiden sind grundsätzlich die Wahl der Materialien und der Einbauort.*
- *Baustoffe emittieren relevante und messbare Mengen an Bioziden, die entweder direkt oder über Kläranlagen in die Fließgewässer gelangen und dort zu UQN-Überschreitungen führen können. Dieser Faktor könnte bei zunehmender klimabedingter Erwärmung noch problematischer werden.*
- *Ein direkter Handlungsbedarf wird für die WSV noch nicht gesehen, da die untersuchten Biozide primär aus Baustoffen des terrestrischen Bereichs über die Kläranlagen in die Gewässer eingetragen werden. Allerdings ist derzeit nicht klar, ob diese Ergebnisse auf andere Zusatzstoffe von Baumaterialien übertragbar sind.*

Mit diesen Methoden konnten wir bestätigen, dass die langfristige Freisetzung von Metall(oid)en aus Wasserbaumaterialien stark von deren Bindungsform abhängt. Etablierte Methoden zur Untersuchung der Freisetzung potenzieller Schadstoffe (z. B. DIN-Verfahren) können zu materialbedingten Artefakten und zur Unterbewertung der Freisetzung führen. Die Freisetzung ausgewählter Metalle und Metalloide aus den untersuchten Materialien nimmt am deutlichsten durch steigende Salzgehalte zu. Die im Zuge des Klimawandels erwarteten Wassertemperaturänderungen spielen hierbei eine untergeordnete Rolle. Unsere Ergebnisse werden zukünftig bei der gewässerchemischen Bewertung des Einbaus von Wasserbaumaterialien berücksichtigt. Ergebnisse aus KLIWAS-Modellen zu Salinitätsänderungen werden noch während der Projektlaufzeit eingebunden.



© Sebastian Kofalk

Durch steigende Mittelwerte der Jahrestemperatur ist damit zu rechnen, dass zukünftig in Bauprodukten verstärkt Biozide und UV-Stabilisatoren verwendet werden, um der Zersetzung der Bauprodukte durch Mikroorganismen und UV-Strahlung vorzubeugen. Mit neu entwickelten nachweisstarken analytischen Methoden (Bestimmungsgrenzen: 1 Nanogramm/L) wurde untersucht, inwieweit die in Baumaterialien enthaltenen Biozide Irgarol und Terbutryn bereits heute durch Was-

serbaumaterialien zu signifikanten Anteilen in Fließgewässer eingetragen werden. Diese beiden Biozide sind von hoher Bedeutung, da sie in die Liste der prioritären Schadstoffe der Wasserrahmenrichtlinie mit extrem tiefen Umweltqualitätsnormen (UQN) von 65 ng/L (Terbutryn) und 2,5 ng/L (Irgarol) aufgenommen werden sollen und bekanntermaßen aus Baumaterialien freigesetzt werden. Neben den Wasserbaumaterialien wurden auch noch weitere mögliche Eintragsquellen (z. B. Kläranlagen) vergleichend betrachtet, da diese Biozide beispielsweise durch Freisetzung aus Regenabläufen von Häuserfassaden über die Schwemmkanalisation in die Kläranlagen gelangen können. Hierbei wurde deutlich, dass Irgarol derzeit in den großen deutschen Fließgewässern wie dem Rhein nicht und Terbutryn nur in geringen Konzentrationen bis zu 6 ng/L nachweisbar sind. In kleinen Gewässern waren beide Biozide und deren biologische Transformationsprodukte dagegen häufig anzutreffen. Die gemessenen Rückstände in den untersuchten kleinen hessischen Fließgewässern resultierten vermutlich vorwiegend vom Eintrag kommunaler Kläranlagen. Hierbei kann festgehalten werden, dass Baustoffe (entweder direkt oder über Kläranlagen) relevante und messbare Mengen an organischen Schadstoffen freisetzen können, die sogar zu Überschreitungen von UQN führen. Bei einer klimabedingten erhöhten Verwendung von Bioziden in Bauprodukten ist daher mit zunehmenden UQN-Überschreitungen bei kleinen Fließgewässern und dem Nachweis in großen Fließgewässern zu rechnen. Ob diese Ergebnisse auch auf andere organische Zusatzstoffe⁴¹ von Baumaterialien übertragbar sind, wird derzeit untersucht. Aus diesem Grunde werden ausgewählte Wasserbaumaterialien (z. B. Polyacrylamide, Polyurethane) auf ihr Potenzial zur Freisetzung bislang nicht identifizierter organischer Stoffe analysiert. In Bezug auf die Freisetzung der beiden ausgewählten Biozide ist zu vermuten, dass der Beitrag der Wasserbaumaterialien im Vergleich zu den Beiträgen von häuslichen Baumaterialien relativ klein ist. Ein Handeln der WSV wird derzeit nicht für erforderlich erachtet. Allerdings sollte man sich immer bewusst sein, dass bei derart tiefen UQN

41 Siehe Glossar.

(2,5 ng/L) auch kleine Beiträge relevant sein können. Bei anderen Inhaltsstoffen von Baumaterialien stehen wir noch ganz am Anfang und müssen zunächst die freigesetzten Stoffe identifizieren.

8.6 KLIMARELEVANTE SCHADSTOFFE: BIOZIDE, INSEKTIZIDE, UV-FILTER

Die klimabedingt erhöhten Mittelwerte der Jahrestemperatur werden voraussichtlich mit zu einer Veränderung/Erhöhung des Einsatzes von Insektiziden, Herbiziden und Bioziden führen. Um den Wandel des Biozideinsatzes zukünftig verfolgen und quantifizieren zu können, wurden neue analytische Messmethoden entwickelt, um Insektizide, Herbizide, Biozide, UV-Filter und Pharmaka in Sedimenten und Wasserproben im unteren Nanogramm/L-Bereich quantifizieren zu können. Zunächst wurde exemplarisch die Belastung der Nordseeküste, Binnenelbe, Elbästuar, Saale, Schwarze Elster, Havel, Rhein, Oder und zahlreicher kleinerer Binnengewässer untersucht.

Unsere Untersuchungen belegen, dass vornehmlich Abflussänderungen die Konzentrationen der organischen Schadstoffe in den Gewässern beeinflussen. Niedrigwasser führt in den Binnenwasserstraßen unmittelbar zu erhöhten Konzentrationen an Schadstoffen, weil auch während Trockenperioden der Zufluss an gereinigtem Abwasser in die Flüsse weitgehend konstant ist. Da die organischen Schadstoffe in der Regel über die kommunalen Kläranlagen in die Gewässer eingetragen werden, würde die Einführung einer 4. Reinigungsstufe zur Entfernung der Spurenstoffe zu einer deutlichen Verbesserung der Gewässerqualität führen.

Ein Einfluss der Temperatur auf die Sorption und Desorption an Sedimenten konnte für die 87 untersuchten Insektizide, Herbizide, Biozide, Pharmaka, Flammschutzmittel und Weichmacher nicht nachgewiesen werden. Eine signifikante Verlagerung der an Sedimenten sorbierten Biozide in die Wasserphase ist auch bei einer klimabedingten Erhöhung der Wassertemperaturen von +2 bis +5 °C nicht zu erwarten.

Aus den temperaturabhängigen Abbaustudien konnten erste Transformationsprodukte identifiziert und in Oberflächengewässern nachgewiesen werden. Eine Evaluierung der Transformationsprodukte erfolgt noch am Projektende. Die Abbaugeschwindigkeit der Biozide nimmt mit der Wassertemperatur von 4 °C über 12 °C bis zu 20 °C zu. Dies gilt für alle untersuchten Stoffe, die mikrobiologisch abbaubar waren. Daher ist davon auszugehen, dass eine klimabedingte Erhöhung der Wassertemperatur (im Mittel +2 °C) vermutlich zu einem geringfügig erhöhten Abbau der organischen Schadstoffe führt. Erst bei extremen Wassertemperaturen (+28 °C) wurde in den Wasser/Sediment-Systemen ein Rückgang des Abbaus der Schadstoffe beobachtet, da sich vermutlich die Zusammensetzung der Biozönosen deutlich veränderte.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

Niedrigwasser führt zu einer Erhöhung der Belastung der Binnenwasserstraßen mit polaren organischen Schadstoffen.

- *Ein Anstieg der Wassertemperatur von +2 bis +5 °C hat a) keinen signifikanten Einfluss auf das Verhältnis der Schadstoffkonzentrationen zwischen wässriger Phase und Sediment und b) führt zu einem beschleunigten Abbau der organischen Schadstoffe.*
- *Die neu entwickelten Methoden der Algentoxine waren sowohl auf Wasserproben als auch auf Eluate von Sedimenten anwendbar. Hierdurch gelang es erste Befunde an Algentoxinen in ausgewählten Oberflächensedimenten (bis 5 cm Tiefe) eines Hafens im inneren Elbe-Ästuar und in der Ostsee zu erheben. Ein direkter Handlungsbedarf wird für die WSV noch nicht gesehen. Hierzu muss die Datenlage noch deutlich verbessert werden.*

8.7 ALGENTOXINE

Bei einer Erhöhung der maximalen Wassertemperatur und bei verringerter Fließgeschwindigkeit können verstärkt Blaualgen (Cyanobakterien) auftreten, welche unter ungünstigen Bedingungen hochaktive Giftstoffe (Algentoxine) produzieren können. Um das Auftreten von Blaualgentoxinen schon frühzeitig zu erkennen, wurden neue empfindlichere analytische Messmethoden entwickelt, mit denen die Algentoxine auch schon in sehr geringen Konzentrationen (wenigen Nanogramm/L) quantifiziert werden können.

Die neu entwickelten Methoden waren sowohl auf Wasserproben als auch auf Eluate von Sedimenten anwendbar. Hierdurch gelang es, erste Befunde an Algentoxinen in ausgewählten Oberflächensedimenten (bis 5 cm Tiefe) eines Hafens im inneren Elbe-Ästuar und in der Ostsee nachzuweisen. Weitergehende Interpretationen sind erst nach umfassenden weiteren Beprobungen, vor allem in den Sommer- und Herbstmonaten, möglich. Dieser Aspekt wäre zukünftig sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene in verschiedenen Bereichen der Gewässerkunde zu adressieren. Die Auswertung der Ergebnisse der Proben aus dem Binnenbereich ist zum Redaktionsschluss noch nicht abgeschlossen; Aussagen hierzu werden Ende 2013 erwartet.

8.8 MIKROBIOLOGISCH-HYGIENISCHE ASPEKTE IN BINNENGEWÄSSERN

Darmbürtige Krankheitserreger können bereits in niedrigen Konzentrationen Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen haben, z. B. während Unterhaltungsarbeiten oder wassersportlichen Aktivitäten. Da deren Nachweis zeit- und kostenintensiv ist, haben wir uns auf die Quantifizierung von Fäkalindikatoren (im Folgenden Fäkalorganismen) konzentriert. Diese gelten als Anzeiger für das Vorkommen darmbürtiger Krankheitserreger.

Im Rahmen von Monitoringstudien haben wir mehrere, klimabedingt veränderliche Parameter und deren Wirkung auf den Eintrag bzw. die Überlebensdauer von Fäkalorganismen untersucht. Vorläufige Analysen an Rhein, Mosel und Lahn geben u. a. deutliche Hinweise darauf, dass hohe Abflüsse und Niederschläge den Eintrag von fäkalbürtigen Krankheitserregern in Gewässer begünstigen. Dagegen führen hohe Globalstrahlungswerte und hohe Wassertemperaturen zu einer verkürzten Lebensdauer und damit zu einer abnehmenden Population. Daraus schließen wir, dass veränderte Abfluss- und Niederschlagsmuster sowie ein Anstieg der ganzjährigen Wassertemperaturen, die unsere Projektionen beispielsweise für den Rhein zeigen, die mikrobiologisch-hygienische Wasserqualität beeinflussen. Derzeit können wir noch nicht auf eine ausreichende Datenbasis zurückgreifen, um belastbare Aussagen hinsichtlich dieser Änderungen treffen zu können. Hinzu kommt, dass Bakterien- und Virenbelastungen stark vom Gewässertyp und vom Einzugsgebiet abhängen; Ergebnisse von einzelnen Messstellen lassen sich schwerlich auf andere Flussgebiete übertragen. Für eine adäquate Einschätzung gewässerhygienischer Zustände ist daher die Entwicklung räumlich differenzierter Modelle zwingend erforderlich.

Ferner konnten wir feststellen, dass extreme Hochwässer zu einem gesundheitlich bedenklichen Anstieg von fäkalbürtigen Bakterien und Viren in den von uns untersuchten Flussabschnitten führen. Die höchste Belastung ist vor der eigentlichen Hochwasserspitze zu erwarten. Zum Schutz vor Infektionen prüfen wir, ob bestehende Vorschriften für

Arbeiten am Gewässer unter diesem Gesichtspunkt ergänzt oder spezielle Broschüren erstellt werden sollten.

Während Niedrigwasserphasen sind die Konzentrationen fäkalbürtiger Bakterien und Viren weitestgehend unbedenklich, jedoch konnten wir an der Lahn beobachten, dass Starkniederschläge insbesondere nach längeren Trockenperioden einen massiven Anstieg von Fäkalorganismen im Gewässer verursachen können. Wir führen dies einerseits auf Abschwemmungen von landwirtschaftlichen Flächen zurück, andererseits auf die Überschreitung der Kapazitäten von Mischwasserentlastungen. Insbesondere im Hinblick auf den Wassersport birgt dies ein mögliches Gefährdungspotenzial, da sich die Verunreinigungen auch stromabwärts in niederschlagsfreien Gebieten bemerkbar machen können.

Weiter ergeben unsere Laborversuche, dass Fäkalorganismen in Sedimenten länger überleben als in der Wasserphase. Dies legt nahe, dass die Resuspension von Sedimenten – auch in Form einer Remobilisierung durch die Unterbringung von Baggergut – eine Rolle für die Verdriftung potenzieller Krankheitserreger im Gewässer spielen könnte.

Derzeitige Erkenntnisse in Kürze:

- *Hohe Abflüsse und Niederschläge fördern den Eintrag von Fäkalorganismen ins Gewässer, erhöhte Wassertemperaturen und Globalstrahlung sorgen für eine verkürzte Lebensdauer.*
- *Extreme Hochwasser führen zu einem gesundheitlich bedenklichen Anstieg von fäkalbürtigen Bakterien und Viren. Zur Minimierung eines Gesundheitsrisikos sollten daher bei Arbeiten am Gewässer Hygieneempfehlungen ausgesprochen werden.*
- *Niederschläge nach längeren Trockenperioden können zu einem massiven Eintrag fäkalbürtiger Mikroorganismen ins Gewässer führen. Die Verschlechterung der Wasserqualität betrifft auch stromabwärts gelegene Gebiete und ist bei wassersportlichen Aktivitäten zu beachten.*
- *Die Belastung mit möglichen Krankheitserregern ist stark vom Gewässertyp und Einzugsgebiet abhängig. Gefährdungsanalysen müssen daher räumlich differenziert vorgenommen werden.*

8.9 AUENVEGETATION

Auenhabitate wie Wälder, Röhrichte, Staudenfluren und Auengrünland erfüllen zahlreiche ökologische und ökonomische Funktionen. Auenwälder beispielsweise tragen zum Erhalt der Wasserqualität bei, dienen der Sediment- und Wasserretention sowie der Sedimentstabilisierung, z. B. im Uferbereich von Flüssen. Darüber hinaus werden Auen als Naherholungsgebiete genutzt und dienen als natürliche Retentionsräume dem Hochwasserschutz. Naturnahe Flussauen sind „Hotspots“ der Biodiversität. Im Forschungsprogramm KLIWAS haben wir untersucht, inwieweit Lebensräume von Auenpflanzen durch den Klimawandel verändert oder beeinträchtigt werden könnten. Wir haben hierfür Habitatmodelle entwickelt und insbesondere Auenhabitate entlang des Rheins untersucht.



Nach den Erkenntnissen der KLIWAS-Modellierungen werden sich die Flusswasserstände und deren Variabilität ändern. Dies wird die Zusammensetzung der Pflanzenarten in den Auen beeinflussen; kleinräumige Verbreitungsmuster werden sich ändern. Eine „einfache“ Verschiebung aller Habitats (z. B. in tiefere Lagen bei sinkenden Wasserständen) ist nicht zu erwarten; vielmehr werden einzelne Arten wie auch Artengemeinschaften unterschiedlich auf veränderte Umweltbedingungen reagieren. Ob ein Habitat auch künftig für bisherige Arten geeignet sein wird, hängt unter anderem von spezifischen räumlichen Faktoren ab; sind beispielsweise Altarme, Flutmulden, Senken und ähnliche Strukturen als typische Habitats für Auenarten vorhanden? Folglich ist jeder Flussabschnitt kleinräumig zu betrachten, um abschätzen zu können, ob bestimmte Vegetationstypen künftig vorkommen können.

Lebensräume tief liegender Standorte in der Aue (für Röhrichte, Seggenriede, Flutrasen, Pioniervegetation) zeigen schon heute eine geringe Ausdehnung. Sollten die Wasserstände weiter absinken, könnten diese Habitats zusätzlich ernsthafte Verluste erleiden, da aufgrund fehlender geomorphologischer Heterogenität in der Aue geeignete Standorte nahezu komplett verschwinden. Einzig die oft schmalen Flussufer würden in diesem Fall als Ersatzhabitat infrage kommen. Eine Option zur Anpassung wäre, die strukturelle Vielfalt im Vorland gezielt zu fördern. Dies könnte durch Schaffung geomorphologischer Strukturen (Altarme, Flutmulden, Senken) geschehen.

Nicht allein die klimabedingt veränderte Hydrologie wirkt auf die Arten in den Auen. Der Mensch könnte – durch die Landnutzung in den Auen – auch direkt einwirken, Habitateigenschaften und damit Pflanzengemeinschaften verändern.

Auch biotische Komponenten (Ausbreitung, Populationsdynamik, Konkurrenz, etc.) sind wichtige Faktoren, die für das tatsächliche Vorkommen von Arten entscheidend sind. Diese biotischen Faktoren könnten sich unter veränderten Umweltbedingungen ebenfalls ändern und sind in jedem Fall für das Vorkommen von Arten entscheidend. Diese biotischen Faktoren berücksichtigen wir gegenwärtig nicht in unseren Habitatmodellierungen.

8.10 INDIKATOREN-KONZEPT

Indikatoren sind Hilfsmittel zum Beschreiben und Bewerten von System-Zuständen, -Zusammenhängen und -Dynamiken. Sie helfen den Handelnden dabei, sich nicht nur ein Bild vom Systemzustand zu machen, sondern auch Rückschlüsse auf das Erreichen von Zielen zu ziehen.

KLIWAS-Forschungsprojekte projizieren den Zustand der Binnenwasserstraßen mit Hilfe unterschiedlichster Kennwerte. Wir erfassen die aus dem Forschungskontext stammenden Kennwerte und erfassen die operativen Kennwerte der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung. Unsere Indikatoren leiten wir aus diesen Kennwerten ab. Sie beschreiben die Betroffenheit des Systems „Binnenwasserstraße“ sowie die Ziele des Managements. Den Ablaufplan für die Indikatorenentwicklung haben wir Arbeiten der EEA (2003)⁴² entlehnt.

Unser Indikatorenkonzept dient dem BMVBS und der Generaldirektion Wasserstraße (GDWS) als Hilfe für strategische Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.

⁴² Für Details siehe EEA, 2003.

ERGEBNISSE

Wir kommen zu dem Schluss, dass für die Indikatorenentwicklung eine Kombination von systemanalytischen Ansätzen, wie dem DPSIR-Schema⁴³, und entscheidungstheoretischen Ansätzen erforderlich ist. Bei der Formulierung der Indikatoren fokussieren wir uns auf die aus Entscheidungsprozessen entstehenden Anforderungen.

Die komplexen Wirkungszusammenhänge und -pfade in der KLIWAS-Modellkette (integraler Ansatz) haben wir zu einem Gesamtbild des Systems „Binnenwasserstraße“ zusammengefügt. Anknüpfungspunkte für sozioökonomische Aspekte sind vorhanden.

Unsere Faktenblätter haben wir den „Indikatoren-factsheets“ der DAS⁴⁴ entlehnt. Wir haben 35 Hauptkennwerte der Forschung in Faktenblättern erfasst. Enthalten sind beispielsweise Kennwerte zu Abflüssen, zu Sedimenteinträgen, zum hygienischen Zustand der Gewässer sowie zur Gewässerökologie. Gleichzeitig haben wir 25 Kennwerte ermittelt, die für das operative Geschäft der WSV stehen, z. B. für das Baggergutmanagement und sonstige Unterhaltungsmaßnahmen.

Die pyramidale Darstellung (Abbildung 17) der Indikatoren zeigt, dass es mehr operative, flussabschnittsbezogene Kennwerte oder Indikatoren gibt als strategische, flussgebietsbezogene und in der räumlichen und zeitlichstatistischen Dimension aggregierte.

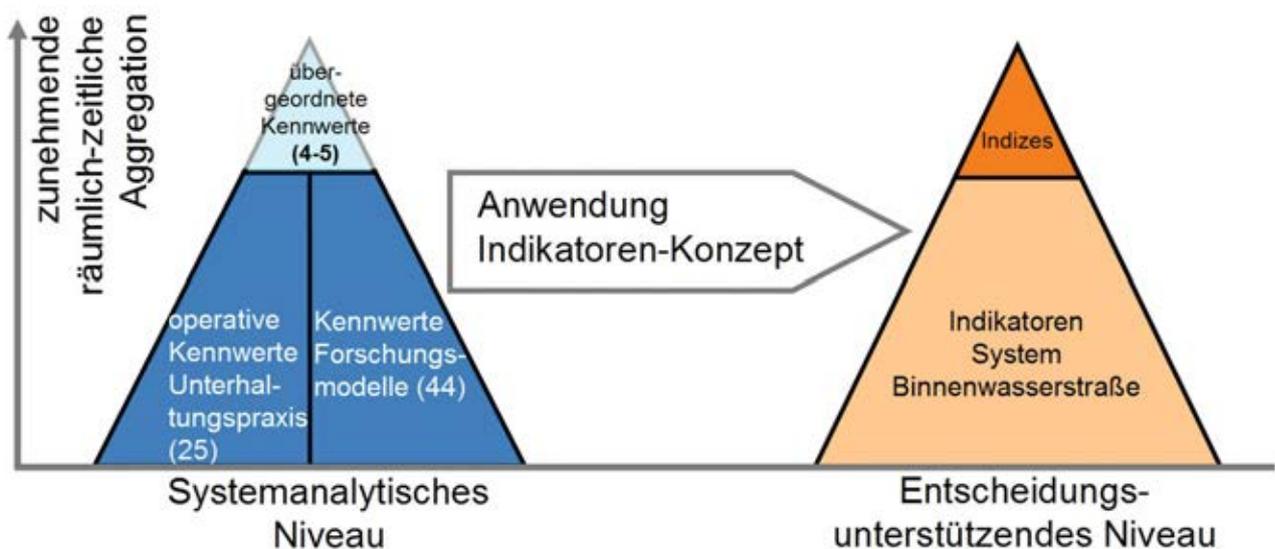


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Indikatorenkonzepts

Die in der WSV und im BMVBS gebräuchlichen Kennwerte unterscheiden sich teilweise in der Begrifflichkeit und in den räumlich-zeitlichen Bezügen von den durch Modellsimulationen dargestellten Kennwerten. In der raum-zeitlichen Abdeckung bestehen häufig Unterschiede. So bezieht sich z. B. der Kennwert „Geschiebebewirtschaftung“ auf Abschnitte des Rheins, umfasst aber alle Unterhaltungsmaßnahmen und wird zeitlich kontinuierlich modelliert. Die Kennwerte der WSV unterscheiden zwischen Geschiebeentnahme, -zugabe und -umlagerung, umfassen unterschiedliche Raumskalen und sind auf einzelne Unterhaltungsereignisse bezogen.

43 Driver Pressure State Impact Response – Schema zur Strukturierung von Indikatoren. – Siehe Glossar.

44 Für Details siehe Schönthaler et al., 2011.

Anschließend haben wir uns mit dem BMVBS über die Art ausgetauscht, wie letztlich eine Vielzahl von Kennwerten für die Entscheidung verwertbar sind bzw. welche „einfachen“ Kenngrößen und Indikatoren trotz komplexer Zusammenhänge zur Entscheidung in der Praxis herangezogen werden.

Diese Erkenntnisse haben wir für die Formulierung von Indikatoren berücksichtigt. Die Maßeinheiten der jeweiligen Indikatoren wählen wir identisch für Referenzdaten der Vergangenheit und für künftige Zustände (aus Projektionen), um Veränderungen vergleichen und bewerten zu können. Operative und Forschungskennwerte zielen oft auf den gleichen Sachverhalt, stellen ihn aber anders dar. In der Forschung geht es z. B. um Sediment-, in der Praxis um Baggergutmengen. Aus unseren Arbeiten resultieren insofern auch Empfehlungen an die Modellierer, ob und wie sie die Art der Darstellung ihrer Kennwerte besser an den Anforderungen der Entscheider ausrichten können.







9. GLOSSAR

Abfluss: Der Abfluss Q gibt das Volumen an, das einen bestimmten Querschnitt in einer Zeiteinheit durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist.

Abflussjahr: Zusammenhängende, zwölfmonatige Periode, die so ausgewählt ist, dass die Gesamtveränderung in der Speicherung minimal ist und der Übertrag auf ein Minimum reduziert wird.

Anpassungsoption: Mögliche Maßnahme, um die Betroffenheit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern (in Anlehnung an Deutsche Anpassungsstrategie, 2008).

Anthropogen: Vom Menschen verursacht.

ARA-Häfen: Häfen von Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen.

Binneneelbe: Der nicht tidebeeinflusste Bereich der Elbe: Quelle bis zum Wehr Geesthacht bei km 585,9.

Ästuar: Tidebeeinflusstes Mündungsgebiet eines Flusses.

Betroffenheit: Das Betroffensein durch den Klimawandel. Der Begriff bezieht sich auf Wirkung des Klimawandels, die sowohl nachteilig als auch positiv sein kann. Nachteilige Effekte können z. B. eingeschränkte Funktionalität/Versagen der Infrastruktur (z. B. Schleusen, Hafenanlagen, Sielbauwerke), erhöhte Sicherheitsrisiken oder erhöhte Unterhaltungskosten sein. Es sind aber auch Effekte für einzelne Menschen, Gruppen oder Betriebe gemeint.

Bias-Korrektur: Korrektur von systematischen Fehlern.

Delegationsstrecke: Abschnitt der Tideelbe zwischen Strom-km 607,50 (Oortkaten/Ortkathen) und 633,35 linkes Ufer (Finkenwerder) bzw. 638,98 rechtes Ufer (Tinsdal) [Norderelbe, Hafengebiet], in dem der Bund die Unterhaltung der Bundeswasserstraße Elbe und den Betrieb der bundeseigenen Schifffahrtsanlagen an die Freie und Hansestadt Hamburg übertragen (delegiert) hat (Glossar der WSV, Portal Tideelbe).

Deutsche Anpassungsstrategie (DAS): Wurde 2008 von der Bundesregierung beschlossen und schafft einen Rahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland. Sie legt den Grundstein für einen mittelfristigen Prozess, in dem Risiken identifiziert, der mögliche Handlungsbedarf benannt, die entsprechenden Ziele definiert sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden.

Downscaling: Methode zur Ableitung von lokalen oder regionalen Informationen aus großskaligen Modellen oder Daten (z. B. Globalmodelle). Zwei Hauptansätze werden unterschieden: a) Das Dynamische Downscaling verwendet Regionale Klimamodelle. b) Das Statistische (oder Empirische) Downscaling.

DPSIR-Schema der Europäischen Umweltagentur: Kann zur Strukturierung von Mensch-Umwelt-Interaktionen genutzt werden. Dabei dienen die Driver(D)-Indikatoren dazu, die Ursachen oder den Antrieb von Umweltveränderungen darzustellen. Meist sind es verschiedene Ursachen, die ein Problem auslösen, aber eine Ursache kann auch verschiedene Wirkungen haben. Die konkreten Belastungen, die durch diese Ursachen entstehen, werden durch die Pressure(P)-Indikatoren beschrieben. State(S)-Indikatoren bilden den momentanen Zustand, also die Qualität der lokalen Umwelt ab. Folgend stellen die Impact(I)-Indikatoren die Auswirkungen dar, die sich aufgrund des sich eingestellten Zustands ergeben. Aber sie geben eben nur die Auswirkungen wider, sie können keine Aussage über die Ursachen treffen. Ergriffene (Gegen)maßnahmen und Reaktionen auf die Umweltveränderungen können schließlich mit den Response(R)-Indikatoren beschrieben werden⁴⁵.

Eigenschwingung: Periodische Bewegung, die ein schwingungsfähiges System ohne Einwirken einer äußeren Kraft ausführen kann.

Engpass: Einschränkung der Benutzbarkeit der Wasserstraße durch Fehltiefen oder Fehlbreiten, ungünstige Strömungsverhältnisse sowie unzureichende Bauwerke und Schifffahrtszeichen.

Engstelle: Bereich einer Einschränkung der Fahrrinnenbreite wegen Ablagerungen von Sedimenten am Fahrrinnenrand oder in der Fahrrinne.

Gefahr: Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden an einem Schutzgut entstehen kann.

Habitat: Lebensraum (hier) für eine typische Pflanzengemeinschaft.

Heiße Tage: Tage mit einem Temperaturmaximum der Lufttemperatur von mehr als 30 °C.

Index: Eine Zahl, die durch mathematische Aggregation eines Satzes von Parametern oder Indikatoren ein Gesamturteil über Zustand oder Dynamik eines Systems anbietet, z. B. das Bruttoinlandsprodukt (Morosini et al., 2001).

Indikator: Ein wissenschaftliches Instrument für Diagnose und Handeln. Er ist ein Parameter oder ein von Parametern abgeleiteter Kennwert, welcher den Zustand oder die Dynamik eines Phänomens, eines Systems oder eines Systemteils beschreibt. Die Bedeutung des Kennwerts muss nicht mit der des Parameters übereinstimmen. Häufig wird der Terminus „Indikator“ im weiteren Sinn als Sammelbegriff für Parameter, Indikatoren und Indices verwendet⁴⁶.

Kältesumme: Die Kältesumme ist die Summe der Beträge der negativen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur über einen bestimmten Zeitraum. Sie wird ohne Einheit angegeben.

45 Nach EEA (2003).

46 Nach Morosini et al., (2001), Girardin et al., (2000) und OECD, (1994); (1998).

Kelvinwelle: Lange Schwerewelle in einem kanalartigen Meeresgebiet, die durch Einfluss der Erddrehung modifiziert wird. Sie läuft auf der Nordhalbkugel gegen den Uhrzeigersinn, ihre Amplitude ist an der Küste am größten und fällt exponentiell mit der Entfernung von dem Rand ab. Gezeitenwellen oder auch durch Tiefdrucksysteme induzierte Oberflächenauslenkungen sind Kelvinwellen.

Kennwert: Charakteristischer Zahlwert (siehe Duden), der einen bestimmten Sachverhalt benennt, ihn erkennbar macht. Beispiel: [m³/s am Pegel Köln]

Klima: Ist eine Folge der physikalisch-chemischen Prozesse im Erdsystem sowie der externen Einflüsse auf dieses System und wird für eine definierte Region durch eine statistische Beschreibung aller relevanten Klimaelemente charakterisiert. Dabei sollte diese statistische Beschreibung für einen genügend langen Zeitraum (üblicherweise 30 Jahre, die sogenannte Normperiode) gelten. (Schönwiese, abgewandelt, 2003)

Klimamodell: Eine numerische Darstellung des Klimasystems, die auf den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften seiner Bestandteile, seinen Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozessen basiert und alle oder einige seiner bekannten Eigenschaften berücksichtigt.

Klimatologie: Repräsentiert das Klima an einem Ort für einen definierten Zeitraum durch Darstellung ausgewählter Variablen (Temperatur, Wind, Strahlung, Strömungen, etc.).

Mesoskalige Strukturen: Größenordnung von einigen 10 bis zu wenigen 100 km.

Monitoring: Langjährige Beobachtung bzw. Erfassung von z. B. Schadstoffdaten in Sedimenten oder Schwebstoffdaten an einer Station oder in einem Beobachtungsbereich.

Neophyten: Pflanzenarten, die nach der Entdeckung Amerikas im Jahre 1492 mit Hilfe des Menschen beabsichtigt oder unbeabsichtigt in ein Gebiet eingebracht wurden, in dem sie von Natur aus nicht vorkommen.

NM7Q: Das niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Niedrigwasserzeitabschnitt.

Nodaltide: Die Nodaltide ist ein Tidezyklus mit einer Periode von 18,6 Jahren. Diese Periode dominiert die Klimatologie von Tidehoch-, Tideniedrig-, Tidemittelwasser sowie den Tidenhub.

Oberwasser: Zufluss, der vom Binnenwasser (z. B. Binnenelbe) über die Tidegrenze (z. B. Staustufe) in das Ästuar fließt.

Parameter: Numerische Mess- oder Kenngröße, die eine Eigenschaft eines Systems misst bzw. umschreibt⁴⁷, z. B. als Koeffizient in Formeln oder hydrologischen Modellen.

⁴⁷ Nach Morosini et al., (2001).

Partialtide: Die Gezeitenwelle lässt sich in Partialtiden zerlegen. Dabei wird die einzelne Partialtide durch eine (harmonische) Sinuswelle abgebildet. Durch Addieren der Partialtiden erhält man eine sehr gute Annäherung an den tatsächlichen zeitlichen Verlauf des astronomischen Anteils der Tide.

Reanalyse: Modellanalysedaten der Atmosphäre, die auf der Assimilation von Beobachtungsdaten der Vergangenheit beruhen und die mithilfe eines einheitlichen Modellsystems sowie eines Assimilationsverfahrens physikalisch konsistent abgeleitet werden (z. B. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis ERA-Interim).

Regionales Klimamodell: Dynamische Verfahren simulieren mit einem höher aufgelösten dynamischen (numerischen) Modell Parameter für Teilgebiete des globalen Modellgebietes und nutzen dazu Eingangsdaten aus dem globalen Klimamodell.

Seiche (frz.): Stehende Welle im Wasserkörper von Seen, Binnenmeeren, Buchten oder Hafenbecken.

Skalenintegration (Upscaling): Hochaufgelöste Daten werden auf ein größeres Gebiet übertragen.

Sommer, hydrologisch: Periode vom 1. 5. eines Jahres bis zum 31.10.

Sommer, meteorologisch: Periode vom 1. 6. bis 31. 8. eines Jahres (vgl. hydrologischer Sommer).

SRES-Szenarien: SRES-Szenarien sind Emissionsszenarien, die von Nakicenovic und Swart (2000) entwickelt wurden und die unter anderem als Basis für die Klimaprojektionen in diesem Bericht verwendet wurden.

Sunkwelle und Schwallwelle: Plötzlich veränderliche instationäre Strömungen in offenen Gerinnen, die durch schnelle Änderungen der Zustandsvariablen wie Geschwindigkeitskomponenten und Wasserstand zu Diskontinuitäten führen. Eine Sunkwelle ist mit einer Wasserspiegelabsenkung verbunden. Eine Schwallwelle geht mit einer Wasserspiegelanhebung einher⁴⁸.

Szenario A1B: Emissionsszenario, das eine ausgewogene Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen berücksichtigt.

Tideelbe: Tidebeeinflusster Bereich der Elbe: Wehr Geesthacht bei km 585,87 bis km 727,2 (VV-WSV 1103).

Vibrionen: Natürlicherweise in Meeren und Küstengewässern vorkommende Bakterien der Gattung Vibrio. Diese Bakteriengattung weist 12 humanpathogene Arten auf.

Winter, hydrologisch: Periode vom 1.11. bis 30. 4. des folgenden Jahres.

Winter, meteorologisch: Periode vom 1.11. eines Jahres bis zum 28. bzw. 29. 2. des Folgejahres (vgl. hydrologischer Winter).

⁴⁸ Nach Martin, H., (1989): Plötzlich veränderliche instationäre Strömungen in offenen Gerinnen. In: Bollrich, G. (1989): Technische Hydromechanik 2.

Winterkältesumme der Lufttemperatur: Summe der Beträge der negativen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur bezogen auf das Winterhalbjahr. Die Kältesumme dient zur Bewertung der thermischen Verhältnisse (Kälte) eines Winters und wird deshalb in der Regel für den gesamten Winter angegeben (in diesem Fall bezogen auf den Zeitraum November bis März). Dabei gilt: Kältesumme unter 100 = mild; Kältesumme 100 bis 199 = mäßig warm; Kältesumme 200 bis 299 = mäßig kalt; Kältesumme 300 und höher = streng.

Zusatzstoffe: Zusatzstoffe entsprechen Einzelkomponenten mit einem Anteil < 1% in der Formulierung des Produktes; diese müssen nicht exakt deklariert werden.



10. ABKÜRZUNGEN

| | |
|---------------|--|
| ADCP | Acoustic Doppler Current Profiler |
| BSRN | Baseline Surface Radiation Network |
| CISL | Computational & Information Systems Laboratory |
| CM SAF | Satellite Application Facility on Climate Monitoring |
| DAS | Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel |
| DJF | Winter: Dezember, Januar, Februar (vgl. JJA) |
| DPSIR | Driver Pressure State Impact Response – Schema zur Strukturierung von Indikatoren |
| ECMWF | European Centre for Medium-Range Weather Forecasts |
| EEA | Europäische Umweltagentur |
| ERA | Extended Reanalysis Envisaged |
| FDC | Abflussdauerkurve |
| GCM | Globale Klimamodelle (global climate models) |
| GZS | Globales Zentrum für Schiffswettermeldungen |
| HAMSOM | Hamburg Shelf Ocean Model |
| HCB | Hexachlorbenzol |
| HM5Q | das höchste arithmetische Mittel von 5 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Niedrigwasserzeitabschnitt |
| HOAPS | Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data |
| HQC | High Quality Control |
| HSW | Höchster Schifffahrtswasserstand |
| HZG | Helmholtz-Zentrum Geesthacht |
| ICDC | Integrated Climate Data Center |
| ICOADS | International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set |
| IFM | Institut für Meereskunde |

| | |
|---------------|---|
| IKSR | Internationale Kommission zum Schutz des Rheins |
| IOW | Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde |
| JJA | Sommer: Juni, Juli, August (vgl. DJF) |
| MARNET | Marines Umweltmessnetz in Nord- und Ostsee |
| MPI | Max-Planck-Institut |
| MPI-OM | Max-Planck-Institute Ocean Model |
| MQ | Mittelwasser |
| MSL | Mittlerer Meeresspiegel (mean sea level) |
| NCAR | National Center for Atmospheric Research |
| NCEP | National Centers for Environmental Prediction |
| NM7Q | das niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Niedrigwasserzeitabschnitt |
| PCB | Polychlorierte Biphenyle |
| RCAO | Rosby Centre Atmosphere-Ocean model |
| RDA | Research Data Archive |
| REMO | Regional Model |
| SMHI | Swedish Meteorological and Hydrological Institute |
| SOOP | Ship Of Opportunity Program |
| SST | Sea Surface Temperature – Ozeanoberflächentemperatur |
| UQN | Umweltqualitätsnormen |



11. LITERATUR

Anonymus (2009): Gemeinsame Übergangsbestimmungen zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern (GÜBAK) zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den fünf Küstenländern, August 2009, 39 S.

Bahls, A. & Kleinschmit, B. (2012): Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Konzeption für ein Langzeitmonitoring der gezeitenbeeinflussten Vegetation mit hochauflösenden Satelliten-Daten. KLIWAS-13/2012, KLIWAS-Projekt 3.09, 44 pp., Koblenz. DOI:10.5675/Kliwas_13.2012_Fernerkundung_2.

Berx, B. & Hughes, S.L. (2009): Climatology of surface and near-bed temperature and salinity on the north-west European continental shelf for 1971–2000, *Continental Shelf Research*, 29, 2286–2292.

BMVBS 2013: Pressemitteilung 153/2013. www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Inhaltsmodule/Thema/153-ferlemann-hafenumschlagsprognose.html

Canny, J. (1986): A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679–698.

Cayula, J. F. & Cornillon, P. (1992): Edge detection algorithm for SST images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 9(1), 67–80.

Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 12. Dezember 2008 beschlossen. www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf

EEA (2003): Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting. Internal Working Paper, Brussels.

Egbert, G. D. & Erofeeva, S. Y. (2002): Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204.

Faude, U. & Schmidlein, S. (2012): Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Analyse von Störstellen, Röhricht- und Neophytenarten. KLIWAS-5/2012, KLIWAS-Projekt 3.09, 54 pp., Koblenz. DOI:10.5675/KLIWAS_5.2012_Fernerkundung_1.

Fuchs, E., Bauer, E. M., Heuner, M., Schmidt-Wygasch, C. & Schröder, U. (2013): Interdisciplinary research on new approaches for future managing the River Elbe. – Proceedings of HP1, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013, IAHS Publ. 358, 8 S.

Girardin, P., Bockstaller, C. & van der Werf, H. (1999): Indicators: Tools to evaluate the Environmental Impacts of Farming Systems. *J. of Sust. Agriculture* 13(4): 5–21.

Gönnert, G., Gerkensmeier, B., Müller, J. M., Sossidi, K. & Thumm, S. (2010): Zur hydrodynamischen Interaktion zwischen den Sturmflutkomponenten Windstau, Tide und Fernwelle, Zwischenbericht TP1a XtremRisk. www.tu-braunschweig.de/MEDIEN-DB/hyukxr/02_goennert_et_al_xtremrisk_sturmflutkomponenten.pdf

Hein, H., Weiss, R., Barjenbruch, U. & Mai, S. (2010): Uncertainties of tide gauges and the estimation of regional sea level rise. Proc. of the Conf. Hydro 2010, Rostock-Warnemünde, 02–05 November 2010.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2011a): What tide gauges reveal about the future sealevel, Aqua Alta, Hamburg, Textbeitrag zur Konferenz.

Hein, H., Mai, S. & Barjenbruch, U. (2011b): Coastal long term processes, tidal characteristics and climate change, Textbeitrag zur Konferenz, 5th International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2011c): Interaction of Wind-Waves and Currents in the Ems-Dollard Estuary. International Journal of Ocean and Climate Systems. Vol. 2, No. 4, December 2011, p. 249–258.

Hein, H., Mai, S. & Barjenbruch, U. (2012a): Uncertainties of drying period in coarse climate impact models. Textbeitrag zur Konferenz, Water - infinitely deformable but still limited, München, 2012.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. & Ganske, A. (2012b): Tidekennwerte und Seegangstatistik – eine Trendanalyse, 2. KLIWAS Statuskonferenz, Berlin.

Hein, H., Mai, S. & Barjenbruch, U. (2013): The long way from uncertain data and knowledge to adaptive management of coastal waterways. – Conference Proceedings of the European Climate Change Adaptation Conference. In: Encyclopedia of Agrophysics (ed. by J. Linski, J. Horabik, & J. Lipiec), 700–704. Springer.

Hellmann, G. (1917): Über strenge Winter. Sitz. Ber. Akad. Wiss. Berlin, 738–759.

Hewitt, C. D. & Griggs, D. J. (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. Eos, Transact., Amer. Geophys. Un. 85, 566.

Holzwarth, I., Hesser, F. & Schulte-Rentrop, A. (2011): Auswirkungen klimabedingter Änderungen auf das Strömungs- und Transportverhalten deutscher Nordseeästuare – ein Vergleich von Ems, Jade-Weser und Elbe. Beitrag Tagungsband HTG-Kongress 07.–09. 09. 2011 in Würzburg.

Imbery, F., Plagemann, S. & Namyslo, J. (2013): Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS, Advances in Science and Research, Vol. 10, 91–98, DOI:10.5194/asr-10-91-2013.

IPCC (2008): Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Ein Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). 109 Seiten.

Jenning, S., Hein, H., Mai, S. & Schüttrumpf, H. (2012): Breaks and long term trends of the tidal characteristics in the southern German Bight, ICCE, International Conference of Coastal Engineering, Santander.

Jenning, S., Hein, H., Mai, S. & Schüttrumpf, H. (2012): Bruchpunkte und Langzeittrends von Wasserstandsmessungen im Tidebereich der Deutschen Bucht. Tagungsband JuWi-Treffen, München 2012.

Karlsson, K. G. et al. (2012): CLARA-A1: The CM-SAF cloud and radiation data set from 28 years of global AVHRR data. In Vorbereitung.

Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B. & Boehm, U. (2009a): Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no. 2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, DOI:10.1594/WDCC/CLM_C20_2_D2.

Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B. & Boehm, U. (2009b): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no. 1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, DOI:10.1594/WDCC/CLM_A1B_1_D2.

Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B. & Boehm, U. (2009c): Climate Simulation with CLM, Scenario A1B run no. 2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, DOI:10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D2.

KHR (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. Report No I-23 of the CHR, ISBN 978-90-70980-35-1, 228 Seiten.

Klein, H. (2012): Klimawandel und ozeanische Fronten: Die KLIWAS-Frontenklimatologie. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-9/2012, S. 12–15.

Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B. & Boehm, U. (2009): Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no. 1, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD, World Data Center for Climate, DOI:10.1594/WDCC/CLM_C20_1_D2.

Levitus, S. & Boyer, T. P. (1994): World Ocean Atlas 1994, Volume 4: Temperature, NOAA ATLAS NESDIS 4, 117 pp.

Martin, H. (1989): Plötzlich veränderliche instationäre Strömungen in offenen Gerinnen. In: Bollrich, G. (1989): Technische Hydromechanik 2, Verlag für Bauwesen, Berlin.

Morosini, M., Schneider, C., Röhm, M., Grünert, A. & Ballschmiter, K. (2001): Umweltindikatoren – Grundlagen, Methodik, Relevanz. Band 1 Pilotstudie in drei Bänden; Projekt: Relevanz von Umweltindikatoren, Akad. für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg.

OECD Organisation for Economic Cooperation and Development (1994): Environmental indicators. Core set. OECD, Paris.

OECD Organisation for Economic Cooperation and Development (1998): Towards sustainable development – environmental indicators. OECD, Paris.

Quiel, K., Becker, A., Kirchesch, V., Schöl, A. & Fischer, H. (2010): Influence of global change on phytoplankton and nutrient cycling in the Elbe River. In: Regional Env. Change. Papers from the Glowa Elbe Project. Springer. DOI:10.1007/s10113-010-0152-2.

Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A. & Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), *Meteorologische Zeitschrift*, accepted.

Röder, A. (2010): Überflutungstoleranz der Neophyten *Impatiens glandulifera* und *Fallopia japonica*. – Bachelor-Arbeit, Universität Hamburg, Biozentrum Klein Flottbek, 68 S.

Rudolph, E., Schulte-Rentrop, A., Schüßler, A., Johannsen, A. (2012): Influence of climate change on storm surge conditions in German Estuaries and testing of probable adaptation strategies. Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics - HIC 2012 Hamburg, Germany: Understanding Changing Climate and Envir.

Schade, N. H., Heinrich, H. & Rosenhagen, G. (2013): Regional Evaluation of ERA-40 Reanalysis Data with Marine Atmospheric Observations in the North Sea Area. *Meteorologische Zeitschrift* (in review).

Schoenberg, W., Kleiß, K. & Jensen, K. (2012): Effekte des Überflutungsregimes auf tidebeeinflusste Röhrichte. Untersuchungen am Beispiel ausgewählter Röhrichtarten an der Elbe. – Bericht, Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde, 42 S.

Schönthaler, K., von Andrian-Werburg, S. & Nickel, D. (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). UBA-Texte 22/2011, UBA-FBNr. 001555, Umweltbundesamt Dessau.

Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, L., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P. & Woollen, J. (2005): The ERA-40 re-analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612), 2961-2012.

Van der Linden, P. & Mitchell, J. F. B. (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.

Wahl, T., Jensen, J. & Frank, T. (2010): On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Natural Hazards of the Earth System Sciences*, 10, 171–179.

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T. & Haigh, I. (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. *Ocean Dynamics*, 61(5), 701–715, DOI:10.1007/s10236-011-0383-x.

Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord (2012): Jahresbericht 2012. www.wsv.de/wsd-n/Service/Broschueren__Flyer_etc/Anlagen/Broschuere_Jahresbericht12_2013_03_12_inet.pdf



12. DAS KLIWAS-TEAM

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD)

Dr. Claudia Frick, Projekt 1.01
 Dr. Annegret Gratzki, Projekt 1.01, Projektleiterin, Federführerin für Vorhaben 1
 Dr. Florian Imbery, Projekt 1.02
 Alex Mazurkiewicz, Projekt 1.01
 Joachim Namyslo, Projekt 1.02, Projektleiter
 Sabrina Plagemann, Projekt 1.02
 Dr. Monika Rauthe, Projekt 1.01
 Ulf Riediger, Projekt 1.01
 Gudrun Rosenhagen, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01, Projektleiterin
 Dr. Bruno Rudolf, Programmverantwortlicher
 Dr. Nils Schade, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Heiko Steiner, Projekt 1.01
 Dr. Birger Tinz, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW)

Dr.-Ing. Annette Büscher, Projekte 2.04 und 3.02
 Benjamin Fricke, Projekte 2.04 und 3.02
 Lucia Hahne, Projekt 4.04
 Fred Hesser, Projekte 2.04 und 3.02
 Dr. Harro Heyer, Programmverantwortlicher
 Ingrid Holzwarth, Projekte 2.04 und 3.02
 Ariane Paesler, Projekte 2.04 und 3.02
 Michael Paprocki, Projekt 4.04
 Dr. Elisabeth Rudolph, Projekte 2.04 und 3.02, Projektleiterin
 Dr. Andreas Schmidt, Programmverantwortlicher
 Dr. Michael Schröder, Projekt 4.03, Projektleiter
 Dr.-Ing. Aissa Sehili, Projekte 2.04 und 3.02
 Dr. Rita Seiffert, Projekte 2.04 und 3.02
 Dr. Guntram Seiß, Projekte 2.04 und 3.02
 Prof. Dr. Bernhard Söhngen, Projekt 4.04, Projektleiter
 Stefanie Wassermann, Projekt 4.04
 Dr. Norbert Winkel, Projekte 2.04 und 3.02, Projektleiter
 Dr. Sven Wurms, Projekt 4.03

BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (BSH)

Dr. Katharina Bülow, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Dr. Anette Ganske, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Dr. Hartmut Heinrich, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01, Projektleiter, Programmverantwortlicher
 Dr. Sabine Hütthl-Kabus, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Dr. Birgit Klein, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Dr. Holger Klein, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Peter Löwe, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Jens Möller, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01
 Dr. Nils Schade, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01

BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BFG)

Dr. Eva-Maria Bauer, Projekt 3.09, Projektleiterin
Dr. Simone Böer, Projekte 3.04 und 5.03
Dr. Vera Breitung, Projekt 5.01
Dr. Nicole Brennholt, Projekte 3.04 und 5.03
Beate Burger, Projekt 3.06 (2009–2012)
Maria Carambia, Projekt 4.01
Dr. Lars Düster, Projekte 3.05 und 5.05, Projektleiter
Dr. Helmut Fischer, Projekt 5.02, Projektleitung und Federführer für Vorhaben 5
Dr. Elmar Fuchs, Projekt 3.09
Dr. Norbert Grope, Projekt 3.06 (2010–2012)
Dr. Birte Hein, Projekt 3.08
Dr. Hartmut Hein, Projekt 2.03
Dr. Peter Heininger, Projekte 3.05 und 5.05
Maike Heuner, Projekt 3.09
Dr. Gudrun Hillebrand, Projekt 5.01, Projektleiterin
Dr. Peter Horchler, Projekt 5.06, Projektleiter
Theresa Horsten, Projekt 4.01
Dr. Bastian Klein, Projekt 4.01
Dr. Carmen Kleisinger, Projekt 3.06
Dr. Sebastian Kofalk, Projekt 5.08, Projektleiter, Koordinator
Prof. Dr. Jochen Koop, Projekt 5.07, Projektleitung
Peter Krahe, Projekt 4.01
Maria Larina, Projekt 4.01
Imke Lingemann, Projekt 4.01
Agnessa Luft, Projekt 5.05
Dr. Stephan Mai, Projekt 2.03, Projektleiter und Federführer für Vorhaben 2
Dr. Thomas Maurer, Projekt 4.05, Projektleiter und Federführer für Vorhaben 4
Andrea Mehling, Koordinatorin, Kommunikatorin
Prof. Dr. Hans Moser, Programmkoordinator, Programmsprecher
Dr. Eva Mosner, Projekt 5.06
Dr. Enno Nilson, Projekt 4.01, Projektleiter
Dr. Thorsten Pohlert, Projekt 5.01
Dr. Georg Reifferscheid, Projekte 3.04 und 5.03, Projektleiter
Marc Roberts, Projekt 4.02
Dr. Michael Schlüsener, Projekte 3.07 und 5.04, Projektleiter
Annekatriin Schmukat, Projekt 3.05
Andreas Schöl, Projekt 3.08, Projektleiter
Uwe Schröder, Projekt 3.09
Dr. Birgit Schubert, Projekt 3.06 und Federführerin für Vorhaben 3
Anja Stanneveld, Koordinatorin, Administratorin
Annette Stosius, Projekt 5.08
Dr. Astrid Sudau, Projekt 2.02, Projektleiterin
Dr. Andreas Sundermeier, Projekt 3.09
Prof. Dr. Thomas Ternes Projekte 3.05, 3.07, 5.04 und 5.05, Projektleiter
Dr. Carsten Viergutz, Projekt 3.08
Dr. Stefan Vollmer, Projekt 5.01, Projektleiter
Robert Weiß, Projekt 2.02
Stefanie Wienhaus, Koordinatorin, Administratorin
Dr. Axel Winterscheid, Projekt 3.03, Projektleiter
Dr. Jens Wyrwa, Projekt 3.08

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT VON KLIWAS

Prof. Dr. Walter Giger, GIGER RESEARCH CONSULTING, Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Karl-Hans Hartwig, Institut für Verkehrswissenschaft der Westfälischen
Wilhelms-Universität Münster

Prof. Dr. Susanne Heise, Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW),
Biogefahrenstoffe und Umwelttoxikologie, Hamburg

Prof. Dr. Christoph Kottmeier, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Prof. Dr. Andreas Macke, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig

Prof. Dr. Patrick Meire, Universität Antwerpen, Direktor der Abteilung Biologie und
Ökosystemmanagementforschung, Belgien

Prof. Dr. Franz Nestmann, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Prof. Dr. Fritz Schiemer, Direktor der Abteilung Süßwasser-Ökologie an der
Universität Wien, Österreich

Prof. Dr. Corinna Schrum, Universität Bergen, Institut für Geophysik, Norwegen

Prof. Dr. Marcel J. F. Stive, Universität Delft, Forschungszentrum Wasser,
Abteilung Wasserbau, Niederlande

KLIWAS-VERANTWORTLICHE DER WSV – KOORDINATIONSEBENE

Michael Heinz, GDWS Außenstelle West, Münster

Tjark Hildebrandt, GDWS Außenstelle Ost, Magdeburg

Martin Mauermann, GDWS Außenstelle Südwest, Mainz

Robert Zierul, GDWS Außenstelle Nord, Kiel



13. DIE KLIWAS-KOOPERATIONSPARTNER UND AUFTRAGNEHMER

AgL Büro für Umweltgutachten, Saerbeck (Projekt 3.08)
 AquaEcology GmbH & Co. KG (Projekt 3.04)
 AQUANTEC Gesellschaft für Umwelt und Wasser mbH (Projekt 4.01)
 Bayrisches Landesamt für Umwelt (BLFU) (Projekt 4.01)
 BioConsult, Bremen (Projekt 3.09)
 Biologische Anstalt Helgoland, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (BAH/AWI) (Projekt 3.04)
 Bremenports, Bremerhaven (Projekt 3.09)
 Brockmann Consult, Geesthacht (Projekt 1.03)
 Büro für Angewandte Hydrologie (BAH), Berlin (Projekt 4.01)
 Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Chemie und Biologie des Meeres (Projekt 3.09)
 Colak GmbH (Projekt 5.06)
 Deltares, Delft und Utrecht, Niederlande (Projekt 3.08 und 4.02)
 Dipl.-Biol. K. Nabel, Pustaszeri (Projekt 5.06)
 Dr. Schumacher, Ing.-Büro für Wasser und Umwelt, Berlin (Projekt 5.02)
 DST Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Duisburg (Projekt 4.01 und 4.04)
 EcoTech (Projekt 3.05)
 Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel (Projekt 2.02)
 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Projekt 4.01)
 Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie (Projekt 1.03 und 2.01)
 Geographisches Institut der Universität Bonn (Projekt 3.09)
 Gesellschaft für Bioanalytik (GBA) (Projekt 3.06, 3.08, 3.09, 5.02 und 5.06)
 Gesundheitsämter der Landkreise Cuxhaven, Leer und Aurich (Projekt 3.04)
 HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik (Projekt 3.09)
 Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Department Naturschutzforschung (Projekt 5.06)
 Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Institut für Küstenforschung (Projekt 2.01)
 Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) (Projekt 4.01 und 5.03)
 HHS Hanseatic Helicopter Service, Hamburg (Projekt 3.09)
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg) (Projekt 3.06 und 5.01)
 Hochschule Konstanz (Projekt 4.01)
 Hochschule Rottenburg (Projekt 4.01)
 HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH (Projekt 4.01)
 HYDROTEC Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH (Projekt 4.01)
 Hygiene-Institut Hamburg (Projekt 3.08)
 IAMARIS (Institute for Advanced Marine and Limnic Studies) (Projekt 3.08)
 Ingenieurbüro Kauppert, Karlsruhe (Projekt 4.04)
 Ingenieurbüro Ludwig (Projekt 4.01)
 Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik (IAWG), Ottobrunn (Projekt 4.01)
 Institut für angewandte Gewässerökologie, Seddin (Projekt 5.02)
 Institut für Meereskunde Hamburg (IFM) (Projekt 1.03, 2.01 und 3.01)

Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement (Projekt 5.01 und 5.06)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Projekt 4.01 und 5.01)
Kisters AG, Aachen (Projekt 2.03)
Koopmann Helicopter, Sommerland (Projekt 3.09)
KÜFOG GmbH, Loxstedt-Ueterlande (Projekt 3.09)
KÜFOG GmbH, Loxstedt-Ueterlande (Projekt 3.09)
Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL) Baden-Württemberg (Projekt 5.01)
Landesamt für Gesundheit und Soziales Mecklenburg-Vorpommern (LAGuS) (Projekt 3.04)
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW) (Projekt 5.03)
Landesuntersuchungsamt Bremen (LUA) (Projekt 5.03)
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) (Projekt 5.02)
Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) (Projekt 3.08)
Leibniz Universität Hannover (Projekt 2.03)
Leibniz Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (Projekt 3.03)
Limnologisches Institut Dr. Nowak, Ottersberg (Projekt 3.04, 3.06 und 5.01)
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg (Projekt 1.03, 2.01, 3.01 und 4.01)
Max-Planck-Institut Magdeburg (Projekt 4.04)
Meteorologisches Institut der Universität Bonn (MIUB) (Projekt 4.01)
MeteoSolutions GmbH, Darmstadt (Projekt 4.01)
Nature-Consult, Hildesheim (Projekt 3.09)
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küste und Naturschutz (NLWKN) (Projekt 5.03)
Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA) Aurich (Projekt 3.04)
NTNU Trondheim, Norwegen (Projekt 4.02 und 5.01)
Pöyry Energie GmbH, Hamburg (Projekt 4.01)
Royal Netherlands Institute for Sea Research (NIOZ, ehemaliges NI-OOCEME) (Projekt 3.09)
RWTH Aachen (Projekt 2.03 und 4.03)
Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut (SMHI), Stockholm, Schweden (Projekt 1.03, 2.01 und 3.01)
Scilands GmbH, Göttingen (Projekt 5.01)
Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven (Projekt 3.04)
Smile Consult, Hannover (Projekt 2.04, 3.02, 3.03 und 4.03)
T. G. Masaryk-Institut für Wasserforschung, Prag, Tschechien (Projekt 5.02)
Tschechisches Hydrometeorologisches Institut Prag, Tschechien (CHMU) (Projekt 4.01)
TU Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung (Projekt 3.09)
TU Dresden, Institut für Botanik (Projekt 3.09)
Umweltbundesamt (Projekt 5.03)
Universität der Bundeswehr München (Projekt 4.03)
Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT) (Projekt 4.04)
Universität Greifswald (Projekt 3.04)
Universität Hamburg (Projekt 2.03)
Universität Hamburg, Biozentrum Klein Flottbek (Projekt 3.09)
Universität Hamburg, Institut für Meereskunde (Projekt 2.01)
Universität Hamburg, Integrated Climate Data Center (ICDC) (Projekt 1.03, 2.01 und 3.01)

Universität Hamburg, Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (Projekt 4.04)
Universität Kassel (Projekt 4.04)
Universität Koblenz-Landau (Projekt 5.02, 5.03 und 5.07)
Universität Köln (Projekt 3.05, 3.08 und 5.02)
Universität Oldenburg (Projekt 3.09)
Universität Osnabrück, Institut für Umweltsystemforschung (Projekt 4.01)
Universität Potsdam, Institut für Geoökologie (Projekt 3.09)
Universität Rostock, Institut für Meerestechnik (Projekt 4.04)
Universität Siegen (Projekt 1.03, 2.01, 2.03 und 3.01)
Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik (ISYS) (Projekt 4.04)
Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS)
(Projekt 4.02)
Universität Würzburg (Projekt 4.01)
Universiteit Antwerpen, Department of Biology, Belgien (Projekt 3.09)
Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen; Vakgroep Civiele Techniek;
Afdeling weg- en waterbouw, Belgien (Projekt 3.09)
Universiteit Utrecht, Niederlande (Projekt 4.02)
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Schweiz
(Projekt 4.04)
Wassertechnologisches Institut GmbH, Wolfenbüttel (WTI) (Projekt 5.03)
WSV mit allen Geschäftsbereichen



14. DIE KLIWAS-PROJEKTE

VORHABEN 1:

VALIDIERUNG UND BEWERTUNG DER KLIMAPROJEKTIONEN – BEREITSTELLUNG VON KLIMASZENARIEN FÜR DEN WIRKUNGSBEREICH WASSERSTRASSEN UND SCHIFFFAHRT

- 1.01** Flussgebietsbezogene hydro-meteorologische Referenzdaten
- 1.02** Bereitstellung anwendungsorientierter und bewerteter Klimaprojektionsdaten
- 1.03** Referenzdaten und Klimaprojektionen für Küste und See

VORHABEN 2:

ERFASSUNG DER VERÄNDERUNGEN DES HYDROLOGISCHEN SYSTEMS DER KÜSTENGEWÄSSER

- 2.01** Parametrisierung von Klimawandelszenarien Küste/See
 - 2.02** Rezente Krustenbewegungen und Validierung von Klimaprojektionen zu Wasserstandsänderungen an den Küsten
 - 2.03** Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangstatistik in den Küstengewässern
 - 2.04** Betroffenheit wasserbaulicher Anlagen der Nordseeküste und der Ästuarie durch Klimaänderungen
- Argo** Array for Realtime Geostrophic Oceanography

VORHABEN 3:

ERFASSUNG DER KLIMABEDINGTEN ÄNDERUNGEN UND DER BETROFFENHEIT DES GEWÄSSERZUSTANDES (MORPHOLOGISCH, QUALITATIV, ÖKOLOGISCH) UND ANPASSUNGSOPTIONEN FÜR SCHIFFFAHRT UND WASSERSTRASSEN

- 3.01** Klimabedingte Auswirkungen auf Küsten, Schifffahrt und Meeresnutzung
- 3.02** Anpassungsoptionen für Wasserstraßen und Häfen an der deutschen Küste sowie für den Küstenschutz bei Extremereignissen
- 3.03** Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuarie
- 3.04** Klimabedingte Änderungen der Gewässerhygiene und Auswirkungen auf das Baggergutmanagement in den Küstengewässern
- 3.05** Klimabedingte Änderung der Lebensdauer und des Umweltverhaltens von Wasserbaumaterialien in Seewasserstraßen
- 3.06** Klimabedingt verändertes Transportverhalten schadstoffbelasteter Sedimente in den Küstengewässern und Unterhaltung von Seewasserstraßen
- 3.07** Klimabedingt verändertes Muster organischer Schadstoffe in Küstenwasserstraßen
- 3.08** Einfluss von klimabedingt veränderten Stoffeinträgen und Oberwasserabflüssen auf die Sauerstoffgehalte der Nordsee-Ästuarie - Folgen für die Sedimentbewirtschaftung
- 3.09** Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung

VORHABEN 4:

ERFASSUNG DER VERÄNDERUNG DES HYDROLOGISCHEN SYSTEMS: SEDIMENTHAUSHALT, MORPHOLOGIE UND ANPASSUNGSOPTIONEN FÜR BINNENWASSERSTRASSEN UND SCHIFFFAHRT

- 4.01** Klimabedingt veränderte Hydrologie und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt
- 4.02** Klimaprojektionen für Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung
- 4.03** Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Änderungen des Durchflussregimes
- 4.04** Ermittlung von Mindestfahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt
- 4.05** Prozessstudien über die Eisbildung auf Wasserstraßen (ab 2011)

VORHABEN 5:

EINFLUSS DES KLIMAWANDELS AUF STRUKTUR, ÖKOLOGISCHE INTEGRITÄT UND BEWIRTSCHAFTUNG DER BINNENWASSERSTRASSEN

- 5.01** Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente
- 5.02** Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen
- 5.03** Klimabedingte Änderungen der Gewässerhygiene und Auswirkungen auf das Baggergutmanagement der Binnenwasserstraßen
- 5.04** Klimabedingt veränderte organische Schadstoffmuster in Binnenwasserstraßen
- 5.05** Klimabedingte Änderung der Lebensdauer und des Umweltverhaltens von Wasserbaumaterialien in Binnenwasserstraßen
- 5.06** Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen
- 5.07** Grundlagen für klimabedingte Anpassung tierökologischer Bewertungsverfahren
- 5.08** Indikatoren zur Bewertung von Klimafolgen und für Anpassungsoptionen auf Flussgebietsskala



KLIWAS

Klima · Wasser · Schifffahrt



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE



Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

**Bundesanstalt für
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de



IMPRESSUM

Herausgeber:

Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination

Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz

Tel.: 0261/1306-0

Fax: 0261/1306-5302

E-Mail: kliwas@bafg.de

Internet: <http://www.kliwas.de>

Redaktion: Andrea Mehling,
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Layout: Michael Spitzer,
IHP/HWRP-Sekretariat
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Druck: Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie (BSH) - Rostock